

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN CARRETE MIXTO  
NO 24 FABRICADO CON METAL Y MATERIAL  
RECUPERADO DE TETRA PAK.**

**KAREN JOHANNA QUINTANA CUELLAR**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA Y MECÁNICA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
SANTIAGO DE CALI  
2008**

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN CARRETE MIXTO  
NO 24 FABRICADO CON METAL Y MATERIAL  
RECUPERADO DE TETRA PAK.**

**KAREN JOHANNA QUINTANA CUELLAR**

**Trabajo de grado para optar el título de  
Ingeniero Mecánico**

**Director  
MIGUEL ANGEL HIDALGO  
Ingeniero Mecánico, MSc.**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA Y MECÁNICA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
SANTIAGO DE CALI  
2008**

**Nota de aceptación:**

**Aprobado por el comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Autónoma de Occidente para optar al título de Ingeniero Mecánico**

**Ing. CARLOS APONTE**  
\_\_\_\_\_  
**Jurado**

**Ing. CARLOS HERRAN**  
\_\_\_\_\_  
**Jurado**

**Santiago de Cali, 04 de Diciembre de 2008**

**Agradezco a Dios por darme la sabiduría para alcanzar este logro tan importante en mi vida, a mi mamá y familia por su apoyo incondicional, a mis amigos y a todos los que de alguna u otra forma aportaron a mi conocimiento y formación.**

**KAREN JOHANNA QUINTANA CUELLAR**

## **CONTENIDO**

	<b>Pág.</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>23</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>25</b>
<b>1. ANTECEDENTES</b>	<b>28</b>
<b>2. JUSTIFICACIÓN</b>	<b>30</b>
<b>3. OBJETIVOS</b>	<b>31</b>
<b>3.1 OBJETIVO GENERAL</b>	<b>31</b>
<b>3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>31</b>
<b>4. MARCO TEÓRICO</b>	<b>32</b>
<b>5. METODOLOGÍA DE DISEÑO</b>	<b>35</b>
<b>5.1 ESTRATEGIA SIMPLIFICADA</b>	<b>36</b>
<b>5.1.1 Etapas de la estrategia simplificada</b>	<b>36</b>
<b>5.2 ESTRATEGIA SISTEMÁTICA</b>	<b>37</b>
<b>5.2.1 Etapas de la estrategia sistemática</b>	<b>38</b>
<b>6. MATRIZ DE CALIDAD QFD</b>	<b>41</b>
<b>6.1 DEFINICIÓN</b>	<b>41</b>
<b>6.2 OBJETIVOS</b>	<b>42</b>
<b>6.3 ESTRUCTURA DEL QFD</b>	<b>42</b>
<b>6.4 VENTAJAS</b>	<b>43</b>

<b>6.5 DESARROLLO DE LA MATRIZ QFD</b>	<b>44</b>
6.5.1 Proceso de fabricación	44
6.5.2 Manejo del carrete	44
6.5.3 Calidad del carrete	45
6.5.4 Condiciones de trabajo	45
6.5.5 Protección del producto empacado en él	45
6.5.6 Estética del carrete	46
6.5.7 Impacto ambiental	46
6.5.8 Obtención de los datos	46
6.5.9 Parámetros de diseño	49
<b>6.6 ANÁLISIS Y RESULTADOS</b>	<b>52</b>
<b>7. PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CARRETE MIXTO No 24</b>	<b>59</b>
<b>7.1 ESTRUCTURA METÁLICA</b>	<b>59</b>
7.1.1 Radio del carrete	59
7.1.2 Curvatura del buje	60
7.1.3 Agujero para el espárrago	60
7.1.4 Despunte del radio	61
7.1.5 Corte en L en el radio	61
7.1.6 Banda de rodamiento	62
7.1.7 Bujes del carrete	62

<b>7.2 PIEZAS EN MADERA</b>	<b>63</b>
7.2.1 Materia prima	63
7.2.2 Cascos de cada sección circular	63
7.2.3 Curvaturas de los cascos	63
7.2.4 Rutiado de los cascos	63
7.2.5 Duelas del tambor	64
7.2.6 Inmunización de la madera	64
<b>7.3 ENSAMBLE</b>	<b>64</b>
7.3.1 Ensamble de radios y buje	64
7.3.2 Ensamble de la banda de rodamiento	65
7.3.3 Platinas laterales	65
7.3.4 Aro de la duela	65
7.3.5 Platina superior de la duela	65
7.3.6 Ubicación de la sección circular	65
7.3.7 Sujeción de la corona circular	65
7.3.8 Tambor	65
<b>7.4 PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN DEL CARRETE MIXTO METAL – POLI ALUMINIO</b>	<b>66</b>
7.4.1 Estructura metálica	66
7.4.2 Piezas en poli aluminio	66
7.4.3 Tapas del carrete	67

7.4.4 Tambor	67
8. PRUEBAS MECÁNICAS	68
8.1 PRUEBAS MECÁNICAS DEL ACERO	68
8.1.1 Ensayo de tracción	71
8.1.2 Ensayo de dureza	87
8.1.3 Ensayo de impacto	90
8.2 PRUEBAS MECÁNICAS DEL POLI ALUMINIO	97
8.2.1 Método de ensayo para determinar las propiedades de tensión en los plásticos	97
8.2.2 Método de ensayo para determinar las propiedades de compresión en los plásticos	107
8.3 PRUEBAS MECÁNICAS DE LA MADERA	113
8.3.1 Ensayo de tracción	113
8.3.2 Ensayo de compresión	121
8.4 COMPARACIÓN DE LAS PRUEBAS MECÁNICAS ENTRE EL SAJO Y EL POLI ALUMINIO	126
8.4.1 Comparación de la prueba de tensión	126
8.4.2 Comparación de la prueba de compresión	128
9. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ELEMENTOS FINITOS	130
9.1 PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS	133
9.2 VENTAJAS DE LOS ELEMENTOS FINITOS	133
9.3 SIMULACIÓN DEL CARRETE POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	134



<b>9.3.1 Análisis y resultados de los esfuerzos presentados en el carrete</b>	<b>135</b>
<b>9.3.2 Análisis y resultados del factor de seguridad presentado en el carrete</b>	<b>139</b>
<b>9.3.3 Análisis y resultados de los desplazamientos presentados en el carrete</b>	<b>141</b>
<b>9.3.4 Análisis y resultados de la caída del carrete</b>	<b>143</b>
<b>9.4 MODELO TEÓRICO</b>	<b>145</b>
<b>9.4.1 Modelo teórico para el tambor</b>	<b>145</b>
<b>9.4.2 Modelo teórico para los radios</b>	<b>150</b>
<b>9.5 REDISEÑO</b>	<b>152</b>
<b>10. CONCLUSIONES</b>	<b>156</b>
<b>11. RECOMENDACIONES</b>	<b>158</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>159</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>162</b>

## **LISTA DE TABLAS**

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1. Encuesta de evaluación de las necesidades del carrete</b>	<b>47</b>
<b>Tabla 2. Casa de la calidad</b>	<b>48</b>
<b>Tabla 3. Necesidades y su respectivo peso ponderado</b>	<b>49</b>
<b>Tabla 4. Matriz de relaciones</b>	<b>51</b>
<b>Tabla 5. Especificaciones de diseño</b>	<b>52</b>
<b>Tabla 6. Resultados de la matriz de calidad</b>	<b>53</b>
<b>Tabla 7. Composición química del acero ASTM A-36</b>	<b>69</b>
<b>Tabla 8. Propiedades mecánicas del acero ASTM A-36</b>	<b>69</b>
<b>Tabla 9. Composición química del acero ASTM A-36, para 5 coladas diferentes</b>	<b>70</b>
<b>Tabla 10. Análisis de la composición química del acero ASTM A-36, obtenida experimentalmente</b>	<b>70</b>
<b>Tabla 11. Efectos de los elementos químicos en las propiedades del material</b>	<b>71</b>
<b>Tabla 12. Resultados del esfuerzo de fluencia</b>	<b>82</b>
<b>Tabla 13. Análisis estadístico de los resultados del esfuerzo de fluencia</b>	<b>82</b>
<b>Tabla 14. Resultados del esfuerzo máximo</b>	<b>83</b>
<b>Tabla 15. Análisis estadístico de los resultados del esfuerzo máximo</b>	<b>83</b>

<b>Tabla 16. Resultados del modulo de elasticidad</b>	<b>85</b>
<b>Tabla 17. Análisis estadístico de los resultados del modulo de elasticidad</b>	<b>85</b>
<b>Tabla 18. Resultados de la elongación</b>	<b>86</b>
<b>Tabla 19. Análisis estadístico de los resultados de la elongación</b>	<b>86</b>
<b>Tabla 20. Resultados de dureza Rockwell B y Vickers en el acero ASTM A-36</b>	<b>90</b>
<b>Tabla 21. Análisis estadístico de los resultados de dureza</b>	<b>90</b>
<b>Tabla 22. Resultados de la resistencia al impacto</b>	<b>95</b>
<b>Tabla 23. Análisis estadístico de los resultados de la prueba de impacto</b>	<b>95</b>
<b>Tabla 24. Resultados de esfuerzo obtenidos de la prueba de tensión en el poli aluminio fabricado en laboratorios de la Autónoma</b>	<b>100</b>
<b>Tabla 25. Análisis estadístico de los resultados de esfuerzo del ensayo de tensión en el poli aluminio fabricado en laboratorios de la Autónoma</b>	<b>100</b>
<b>Tabla 26. Resultados de esfuerzos del ensayo de tracción de un material fabricado en producción industrial</b>	<b>101</b>
<b>Tabla 27. Análisis estadístico de los resultados de esfuerzo obtenidos del material fabricado en producción industrial</b>	<b>101</b>
<b>Tabla 28. Resultados de la resistencia a la cedencia a 0,1% de compensación del poli aluminio fabricado en laboratorios de la Autónoma</b>	<b>102</b>
<b>Tabla 29. Análisis estadístico de los resultados de la resistencia a la cedencia a 0,1% de compensación del poli aluminio fabricado en laboratorios de la Autónoma</b>	<b>102</b>

<b>Tabla 30. Resultados de la resistencia a la cedencia a 0,1% de compensación del poli aluminio fabricado en producción industrial</b>	<b>103</b>
<b>Tabla 31. Análisis estadístico de los resultados de la resistencia a la cedencia a 0,1% de compensación del poli aluminio fabricado en producción industrial</b>	<b>103</b>
<b>Tabla 32. Resultados del modulo de elasticidad obtenidos en la prueba de tensión del poli aluminio fabricado en laboratorios de la Autónoma</b>	<b>104</b>
<b>Tabla 33. Análisis estadístico de los resultados del módulo de elasticidad del ensayo de tensión en el poli aluminio fabricado en la Autónoma</b>	<b>105</b>
<b>Tabla 34. Resultados del modulo de elasticidad obtenidos en la prueba de tensión del poli aluminio fabricado en producción industrial</b>	<b>105</b>
<b>Tabla 35. Análisis estadístico de los resultados del módulo de elasticidad del ensayo de tensión en el poli aluminio fabricado en producción industrial</b>	<b>105</b>
<b>Tabla 36. Porcentaje de elongación obtenido en el ensayo de tracción del poli aluminio fabricado en laboratorios de la Autónoma</b>	<b>106</b>
<b>Tabla 37. Análisis estadístico de los resultados del % de elongación del ensayo de tensión en el poli aluminio fabricado en laboratorios de la Autónoma</b>	<b>106</b>
<b>Tabla 38. Análisis estadístico de los resultados del % de elongación del ensayo de tensión en el poli aluminio fabricado en producción industrial</b>	<b>106</b>
<b>Tabla 39. Análisis estadístico de los resultados del % de elongación del ensayo de tensión en el poli aluminio fabricado en producción industrial</b>	<b>106</b>

<b>Tabla 40. Resultados de esfuerzo obtenidos de la prueba de compresión en el poli aluminio fabricado en laboratorios de la Autónoma</b>	<b>108</b>
<b>Tabla 41. Análisis estadístico de los resultados de esfuerzo del ensayo de compresión en el poli aluminio fabricado en laboratorios de la Autónoma</b>	<b>109</b>
<b>Tabla 42. Resultados de esfuerzo obtenidos de la prueba de compresión en el poli aluminio fabricado en producción industrial</b>	<b>110</b>
<b>Tabla 43. Análisis estadístico de los resultados de esfuerzo del ensayo de compresión en el poli aluminio fabricado en producción industrial</b>	<b>110</b>
<b>Tabla 44. Resultados del modulo de elasticidad a compresión para el poli aluminio fabricado en laboratorios de la Autónoma</b>	<b>111</b>
<b>Tabla 45. Análisis estadístico de los resultados del módulo de elasticidad a compresión del poli aluminio fabricado en laboratorios de la Autónoma</b>	<b>111</b>
<b>Tabla 46. Resultados del modulo de elasticidad a compresión para el poli aluminio fabricado en producción industrial</b>	<b>111</b>
<b>Tabla 47. Análisis estadístico de los resultados del módulo de elasticidad a compresión del poli aluminio fabricado en producción industrial</b>	<b>111</b>
<b>Tabla 48. Porcentaje de compresión del poli aluminio fabricado en laboratorios de la Autónoma</b>	<b>112</b>
<b>Tabla 49. Análisis estadístico de los resultados del % de compresión del poli aluminio fabricado en laboratorios de la Autónoma</b>	<b>112</b>
<b>Tabla 50. Porcentaje de compresión del poli aluminio fabricado en producción industrial</b>	<b>113</b>

<b>Tabla 51. Análisis estadístico de los resultados del % de compresión del poli aluminio fabricado en producción industrial</b>	<b>113</b>
<b>Tabla 52. Resultados del esfuerzo último para el ensayo de tracción paralela al grano</b>	<b>116</b>
<b>Tabla 53. Análisis estadístico de los resultados del esfuerzo último para el ensayo de tracción paralela al grano</b>	<b>116</b>
<b>Tabla 54. Resultados del modulo de elasticidad. Ensayo de tracción paralela al grano</b>	<b>117</b>
<b>Tabla 55. Análisis estadístico de los resultados del modulo de elasticidad. Ensayo de tracción paralela al grano</b>	<b>117</b>
<b>Tabla 56. Resultados de la deformación porcentual. Ensayo de tracción paralela al grano</b>	<b>117</b>
<b>Tabla 57. Análisis estadístico de los resultados de la deformación porcentual. Ensayo de tracción paralela al grano</b>	<b>118</b>
<b>Tabla 58. Resultados del esfuerzo último para el ensayo de tracción perpendicular al grano</b>	<b>120</b>
<b>Tabla 69. Análisis estadístico de los resultados del esfuerzo último para el ensayo de tracción perpendicular al grano</b>	<b>120</b>
<b>Tabla 60. Resultados del modulo de elasticidad. Ensayo de tracción perpendicular al grano</b>	<b>120</b>
<b>Tabla 61. Análisis estadístico de los resultados del modulo de elasticidad. Ensayo de tracción perpendicular al grano</b>	<b>121</b>
<b>Tabla 62. Resultados de la deformación porcentual. Ensayo de tracción perpendicular al grano</b>	<b>121</b>
<b>Tabla 63. Análisis estadístico de los resultados de la deformación porcentual. Ensayo de tracción perpendicular al grano</b>	<b>121</b>

<b>Tabla 64. Resultados de esfuerzo último por compresión paralela al grano</b>	<b>123</b>
<b>Tabla 65. Análisis estadístico de los resultados de esfuerzo último por compresión paralela al grano</b>	<b>124</b>
<b>Tabla 66. Resultados del modulo de elasticidad a compresión</b>	<b>124</b>
<b>Tabla 67. Análisis estadístico de los resultados del modulo de elasticidad</b>	<b>124</b>
<b>Tabla 68. Resultados de la deformación porcentual. Ensayo de compresión paralela al grano</b>	<b>125</b>
<b>Tabla 69. Resultados de la deformación porcentual. Ensayo de compresión paralela al grano</b>	<b>125</b>
<b>Tabla 70. Resistencia máxima a la tracción, poli aluminio y madera paralela al grano</b>	<b>126</b>
<b>Tabla 71. Modulo de elasticidad a tensión, poli aluminio y madera paralelo al grano</b>	<b>126</b>
<b>Tabla 72. Porcentaje de elongación, poli aluminio y madera paralelo al grano</b>	<b>127</b>
<b>Tabla 73. Resistencia máxima a la tracción, poli aluminio y madera perpendicular al grano</b>	<b>127</b>
<b>Tabla 74. Modulo de elasticidad a tensión, poli aluminio y madera perpendicular al grano</b>	<b>127</b>
<b>Tabla 75. Porcentaje de elongación, poli aluminio y madera perpendicular al grano</b>	<b>128</b>
<b>Tabla 76. Resistencia máxima a la tracción, poli aluminio y madera paralela al grano</b>	<b>128</b>
<b>Tabla 77. Modulo de elasticidad a compresión, poli aluminio y madera paralelo al grano</b>	<b>128</b>

<b>Tabla 78. Porcentaje de compresión, poli aluminio y madera paralelo al grano</b>	<b>129</b>
<b>Tabla 79. Comparación entre los tipos de solución</b>	<b>132</b>
<b>Tabla 80. Resultados del rediseño del carrete</b>	<b>155</b>



## **LISTA DE FIGURAS**

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1. Estrategia simplificada</b>	<b>36</b>
<b>Figura 2. Estrategia sistemática</b>	<b>38</b>
<b>Figura 3. Ventajas de la matriz QFD</b>	<b>43</b>
<b>Figura 4. Puntos porcentuales a ganar con cada necesidad</b>	<b>54</b>
<b>Figura 5. Importancia de las necesidades</b>	<b>55</b>
<b>Figura 6. Influencia de los parámetros de diseño</b>	<b>57</b>
<b>Figura 7. Radio del carrete</b>	<b>59</b>
<b>Figura 8. Sección circular del radio</b>	<b>60</b>
<b>Figura 9. Agujero para espárrago</b>	<b>60</b>
<b>Figura 10. Despunte en el radio</b>	<b>61</b>
<b>Figura 11. Radio del carrete No 24</b>	<b>61</b>
<b>Figura 12. Banda de rodamiento</b>	<b>62</b>
<b>Figura 13. Buje del carrete</b>	<b>62</b>
<b>Figura 14. Sección de la corona circular</b>	<b>63</b>
<b>Figura 15. Duelas del tambor del carrete</b>	<b>64</b>
<b>Figura 16. Carrete mixto metal – madera</b>	<b>66</b>
<b>Figura 17. Tapas del carrete mixto metal – poli aluminio</b>	<b>67</b>
<b>Figura 18. Carrete mixto metal- poli aluminio</b>	<b>67</b>

<b>Figura 19. Montaje de la probeta en la Máquina Universal de ensayos UTS 200.3</b>	<b>72</b>
<b>Figura 20. Perfil en L de alas iguales</b>	<b>73</b>
<b>Figura 21. Sección rectangular obtenida a partir del perfil</b>	<b>73</b>
<b>Figura 22. Operación de maquinado en la Fresadora Universal Nantong</b>	<b>73</b>
<b>Figura 23. Probeta de tensión sin los radios</b>	<b>74</b>
<b>Figura 24. Probeta de tensión terminada</b>	<b>74</b>
<b>Figura 25. Lote de probetas de ensayo</b>	<b>74</b>
<b>Figura 26. Plano de la probeta para el ensayo de tensión</b>	<b>75</b>
<b>Figura 27. Máquina universal de ensayos UTS 200.3</b>	<b>76</b>
<b>Figura 28. Descripción de la curva Esfuerzo vs. Deformación</b>	<b>77</b>
<b>Figura 29. Cuello de la probeta</b>	<b>79</b>
<b>Figura 30. Probeta fracturada</b>	<b>79</b>
<b>Figura 31. Figura del Esfuerzo vs. Deformación porcentual de la probeta No. 7</b>	<b>81</b>
<b>Figura 32. Esfuerzo Vs. Deformación unitaria</b>	<b>84</b>
<b>Figura 33. Elongación de la probeta</b>	<b>86</b>
<b>Figura 34. Cuello de la probeta</b>	<b>87</b>
<b>Figura 35. Sección circular</b>	<b>88</b>
<b>Figura 36. Probeta de ensayo obtenida a partir de la sección circular</b>	<b>88</b>

<b>Figura 37. Plano de la probeta para la prueba de micro dureza</b>	<b>88</b>
<b>Figura 38. Micro durómetro Vickers Indentec modelo ZHV1</b>	<b>89</b>
<b>Figura 39. Sección circular</b>	<b>91</b>
<b>Figura 40. Proceso de maquinado en la Fresadora Universal Nantong</b>	<b>91</b>
<b>Figura 41. Sección rectangular obtenida de la sección circular</b>	<b>92</b>
<b>Figura 42. Probeta de ensayo con muesca en V para prueba de impacto Charpy</b>	<b>92</b>
<b>Figura 43. Plano de la probeta para la prueba de impacto</b>	<b>93</b>
<b>Figura 44. Máquina par aprueba de impacto Charpy</b>	<b>94</b>
<b>Figura 45. Probeta fracturada</b>	<b>96</b>
<b>Figura 46. Probeta no fracturada</b>	<b>96</b>
<b>Figura 47. Lamina de poli aluminio</b>	<b>98</b>
<b>Figura 48. Plano de la probeta para la prueba de tracción de plásticos tipo I. Dimensiones en mm</b>	<b>98</b>
<b>Figura 49. Máquina de ensayos Instron 3366</b>	<b>99</b>
<b>Figura 50. Probeta de tracción de poli aluminio después del ensayo</b>	<b>101</b>
<b>Figura 51. Grafica de Esfuerzo Vs. Deformación unitaria</b>	<b>104</b>
<b>Figura 52. Probeta de compresión después del ensayo</b>	<b>109</b>
<b>Figura 53. Plano de la probeta de madera para ensayo de tracción paralela al grano</b>	<b>114</b>

<b>Figura 54. Probetas para el ensayo de tracción paralela al grano</b>	<b>115</b>
<b>Figura 55. Esfuerzo vs. Deformación sin zona plástica. Ensayo de tracción paralela al grano</b>	<b>115</b>
<b>Figura 56. Plano de probeta de madera para ensayo de tracción perpendicular al grano</b>	<b>118</b>
<b>Figura 57. Esfuerzo vs. Deformación sin zona plástica. Ensayo de tracción perpendicular al grano</b>	<b>119</b>
<b>Figura 58. Plano de la probeta de ensayo de compresión paralela al grano</b>	<b>122</b>
<b>Figura 59. Comportamiento frágil de la madera sometida a compresión. Grafica de Esfuerzo vs. Deformación</b>	<b>123</b>
<b>Figura 60. Integración de diferentes campos de la ingeniería</b>	<b>132</b>
<b>Figura 61. Carrete en condición normal de trabajo</b>	<b>135</b>
<b>Figura 62. Carrete levantado por el montacargas</b>	<b>136</b>
<b>Figura 63. Carrete restringido en el buje</b>	<b>136</b>
<b>Figura 64. Esfuerzos en el carrete en condición normal de trabajo</b>	<b>137</b>
<b>Figura 65. Esfuerzos en el carrete bajo la acción del montacargas</b>	<b>138</b>
<b>Figura 66. Esfuerzos en el carrete restringido en el buje</b>	<b>138</b>
<b>Figura 67. Factor de seguridad en condición normal del trabajo</b>	<b>139</b>
<b>Figura 68. Factor de seguridad bajo la acción del montacargas</b>	<b>140</b>
<b>Figura 69. Factor de seguridad restringido en el buje</b>	<b>140</b>

<b>Figura 70. Desplazamientos en el carrete en la condición normal de trabajo</b>	<b>141</b>
<b>Figura 71. Desplazamiento en el carrete bajo la acción del montacargas</b>	<b>142</b>
<b>Figura 72. Desplazamiento en el carrete restringido en el buje</b>	<b>142</b>
<b>Figura 73. Grafica de Distancia Vs. Tiempo</b>	<b>143</b>
<b>Figura 74. Esfuerzos en el carrete en la caída desde 1 metro de altura</b>	<b>144</b>
<b>Figura 75. Factor de seguridad en el carrete en la caída desde 1 metro de altura</b>	<b>144</b>
<b>Figura 76. Diagrama de cuerpo libre de la aproximación del tambor</b>	<b>146</b>
<b>Figura 77. Diagrama de cuerpo libre en la sección de corte</b>	<b>147</b>
<b>Figura 78. Diagrama de cortante y momento flector</b>	<b>148</b>
<b>Figura 79. Esfuerzos obtenidos en el tambor por el método de elementos finitos</b>	<b>149</b>
<b>Figura 80. Diagrama de la columna</b>	<b>151</b>
<b>Figura 81. Esfuerzos obtenidos en la estructura por el método de elementos finitos</b>	<b>151</b>
<b>Figura 82. Factor de seguridad del rediseño del carrete en la condición más crítica</b>	<b>153</b>
<b>Figura 83. Esfuerzos del rediseño del carrete en la condición más crítica</b>	<b>154</b>
<b>Figura 84. Desplazamiento del rediseño del carrete en la condición más crítica</b>	<b>154</b>

## **LISTA DE ANEXOS**

	<b>Pág.</b>
<b>Anexo A. Plano del carrete mixto No 24</b>	<b>162</b>
<b>Anexo B. Plano de las mordazas empleadas para el ensayo a tracción paralela al grano</b>	<b>163</b>
<b>Anexo C. Plano de las mordazas empleadas para el ensayo a tracción perpendicular al grano</b>	<b>164</b>

## RESUMEN

En este proyecto se realizó el análisis del comportamiento mecánico del carrete mixto No 24 fabricado con estructura metálica y cuerpo en poli aluminio, el cual es utilizado para el empaque de cables eléctricos y telefónicos, con el fin de determinar la viabilidad de que este carrete reemplace el carrete mixto No 24 fabricado con estructura metálica y cuerpo en madera, por la empresa **RECUPERADOS Y SERVICIOS INDUSTRIALES LTDA (R.S.I. LTDA)**, el cual se encuentra actualmente desempeñando en la industria; ya que la utilidad de este carrete presenta inconvenientes en la productividad, calidad, eficiencia y economía por la implementación de la madera.

Para realizar este análisis de viabilidad de este carrete se implementó la metodología de un diseño evolutivo fundamentada en las herramientas computacionales CAD/CAE (Dibujo asistido por computador/ Ingeniería asistida por computador).

Adoptando los criterios de la metodología de diseño de ingeniería, inicialmente se implementa la metodología QFD para determinar los aspectos de ingeniería más importantes a tener en cuenta en este proceso de diseño y seleccionar con base en las necesidades del cliente los criterios de diseño que finalmente permita definir la aprobación o rechazo de este proyecto.

La utilidad del CAD, Solid Edge V 19, fue el paso a seguir para realizar el diseño del carrete, siguiendo la geometría y características establecidas para el carrete de esta referencia (No 24), conservando la estructura metálica del carrete mixto metal – madera de la misma referencia, ya existente, y realizando algunas modificaciones en el cuerpo del carrete, las cuales favorecen el proceso de producción del carrete al reducir el número de piezas a ensamblar.

Siguiendo las normas ICONTEC para los plásticos y las ASTM para los aceros se realizaron las pruebas mecánicas de dureza, tracción, impacto y compresión tanto para el acero estructural ASTM A36 como para el poli aluminio utilizando los equipos de los laboratorios de la universidad Autónoma de Occidente. Estas pruebas se realizaron para determinar las propiedades mecánicas, relacionadas anteriormente, de estos materiales y poder aplicarlas en el CAE para realizar la simulación del carrete bajo las condiciones reales de los materiales a implementar.

A través del CAE Algor V21.1 se simuló las posibles condiciones de trabajo que debe soportar el carrete para evaluar el comportamiento del este, en cuanto a cargas, esfuerzos, deformaciones y factores de seguridad principalmente, y determinar de esta forma la seguridad y confiabilidad del diseño y realizar las modificaciones que sean necesarias en casos de falla o sobre dimensionamiento. El uso de esta herramienta computacional permite

obtener aproximaciones al funcionamiento del carrete, por medio de la simulando con resultados muy confiables y cercanos a la realidad.



## INTRODUCCIÓN

La fabricación de cables eléctricos y telefónicos es una industria bastante amplia a nivel mundial; y un factor importante es el empaque de estos, para lo que se utilizan carretes de diversas formas, tamaños y materiales, dependiendo principalmente del peso y las condiciones de trabajo a las cuales sean sometidos.

Estos carretes pueden tener tamaños de más de 2.40m de diámetro y soportar pesos de más de seis toneladas, dependiendo del peso del material de fabricación de los cables que pueden ser acero y/o cobre, y del diámetro de estos.

La gran cantidad de carretes esta ligada a la gran cantidad de referencias de cables que existen en el mercado, lo cual obliga a cumplir con ciertas especificaciones en cada uno de los casos, como el tamaño, la capacidad de carga, el material de fabricación entre otras.

Para el caso de los cables más pesados como los conductores de cobre o acero no recubiertos, se utilizan carretes metálicos construidos en acero y carretes mixtos de madera-metal. Para los cables de bajo peso se utilizan carretes plásticos o fabricados en láminas de triplex, aglomerados de astillas de madera o aglomerados de celulosa de madera MDF (tableros aglomerados de mediana densidad), desde 25 cm. de diámetro en adelante, con tambor de madera o de cartón.

En Colombia el mayor fabricante de cables, CENTELSA SA, trabaja con más de 70 referencias (27 carretes de madera, 25 carretes metálicos, 12 carretes mixtos, 9 carretes de triplex/aglomerado).

Todo carrete se compone de tres partes, ver el plano del carrete en el anexo A:

- Las dos tapas laterales (también llamadas paredes, discos o alas).
- El tambor (centro, eje o núcleo).
- El herraje, que son las varillas que sujetan las dos tapas laterales.

El presente proyecto evalúa el comportamiento mecánico del carrete No 24 con dimensiones de 240 cm. de diámetro en las alas, 140cm. de diámetro en el tambor y 120 cm. de largo del tambor, el cual se utiliza para el empaque de cables eléctricos y telefónicos, fabricado con estructura metálica y el cuerpo en poli aluminio, material reciclado de polietileno y aluminio; remplazando así el consumo de madera de bosques nativos, la cual se utiliza actualmente para su fabricación por la empresa **RECUPERADOS Y SERVICIOS INDUSTRIALES LTDA (R.S.I. LTDA)**.

El implemento de este nuevo material ofrece grandes oportunidades a la empresa ya que es de bajo costo pues se obtiene a partir de un material de desecho, de alta disponibilidad que permite reducir el impacto ambiental producido por el inadecuado reciclaje de este nuevo material y reduce en gran manera los altos costos relacionados con la fabricación de este en madera.

Estos problemas presentados por la madera se pueden demarcar por factores ambientales y económicos bastante complejos, que se pueden caracterizar de la siguiente forma:

- Alto desperdicio en el proceso de madera.
- Baja productividad de la mano de obra.
- Problemas de calidad por el secado de la madera.
- Ninguna posibilidad de aprovechar los residuos del proceso en la misma línea de producción.
- Periodos de escasez y alza de precio de la madera.
- Necesidad de utilizar inmunizantes para la madera.

La sustitución de la madera por el nuevo material poli aluminio, es una de las opciones más viables para subsanar esta problemática debido a los factores económicos y ambientales mencionados anteriormente; para lo cual fue necesario realizar estudios que permitan determinar el cumplimiento de los requerimientos de las propiedades mecánicas para garantizar el óptimo funcionamiento de estos.

Con el desarrollo de este proyecto se pretenden mejorar los aspectos deficientes que presenta actualmente el carrete fabricado en madera, con el animo de ofrecer una mejor calidad en el producto terminado y una mayor eficiencia aprovechando al máximo los recursos disponibles del material

reciclable tetra Pak, para obtener un proceso de fabricación más económico y de mejor calidad.

De igual forma el disponer adecuadamente de un material de desecho permite preservar el medio ambiente pues es un material de bajo costo y abundante que actualmente genera grandes complicaciones en el reciclaje y aumenta la contaminación ambiental. Esta solución permite resolver el problema del desperdicio de la materia de prima de la empresa y aprovechar una oportunidad del mercado, buscando un material alternativo que permita la sustitución de la madera en la fabricación de los carretes, en miras a una adecuada utilización de los residuos de tetra Pak.

## 1. ANTECEDENTES

A nivel mundial son muy pocas las industrias cableras que utilizan carretes mixtos metal-madera para el empaque de sus productos. A nivel nacional solamente la empresa CABLES DE ENERGIA Y TELECOMUNICACIONES S.A. (**CENTELSA**), utiliza carretes mixtos fabricados por RSI. Ltda., para empaque de cables telefónicos.

No hay antecedentes de empresas fabricantes de carretes en Colombia o en Latinoamérica que estén utilizando materiales compuestos a base de residuos de tetra pak para la fabricación de carretes

Existen empresas a nivel mundial que fabrican tableros aglomerados **100% de Tetra pak**, como en Alemania (Tectán), Brasil (Reciplak), China (Chiptec), Argentina (T-plak), Kenya (Lamiboard), Pakistán (Green Board), Turquía (Yekpan), España (Maplar), Chile, Tailandia, India, y otros países, pero han orientado estos productos para el uso comercial; en Colombia hay un proyecto de la Vicepresidencia de la República en unión con TETRA PAK COLOMBIA para la construcción de viviendas de interés social, pero no hay antecedentes de su aplicación en la fabricación de carretes para empaque de cables.

En Colombia solo Ecoplak se dedica a la producción de tableros aglomerados con base en residuos de Tetra pak.

Sin embargo estos tableros que se comercializan mundialmente no son rentables para la fabricación de carretes con los métodos tradicionales, por las siguientes razones:

- Estos tableros son de alta densidad (más de  $1000 \text{ kg/m}^3$ ) debido a que contienen la totalidad de la fibra del cartón de tetra pak, lo cual haría que los carretes tuvieran el doble del peso que tienen los fabricados con madera. Por lo cual es recomendable fabricar piezas solamente con la fracción de poli-aluminio que contiene el tetra pak original cuya densidad es del 70%.
- El precio del aglomerado se cobra por peso en kg lo cual sería un factor negativo para la fabricación de carretes y a esto se le adiciona el transporte de Bogotá a Cali, lo cual incrementa aun más los costos.

- Las dimensiones de los tableros que se producen actualmente en Colombia (120 \* 240 cm) hacen que haya un gran desperdicio de material, presentando el mismo problema que se tiene actualmente con la madera.

En cuanto a la Fabricación de aglomerados de Tetra pak despulpado (poli aluminio) en Brasil se está utilizando intensivamente en aplicaciones como las tejas para viviendas, existiendo once fabricas de este producto principalmente en las áreas aledañas a las plantas despulpadoras.

En Bogotá (Colombia) se han comenzado a fabricar tejas con el poli aluminio en pequeñas industrias cartoneras. Este proceso también se está desarrollado en una multinacional cartonera de Cali y en otra fábrica de cartones en Cartago (Valle del Cauca), con el apoyo de **TETRA PAK COLOMBIA**.

## **2. JUSTIFICACIÓN**

Con el desarrollo de este proyecto se pretenden mejorar los aspectos deficientes que presenta actualmente el carrete fabricado en madera, con el ánimo de ofrecer una mejor calidad en el producto terminado y una mayor eficiencia aprovechando al máximo los recursos disponibles del material reciclable tetra Pak, para obtener un proceso de fabricación más económico y de mejor calidad.

De igual forma el disponer adecuadamente de un material de desecho permite preservar el medio ambiente pues es un material de bajo costo y abundante que actualmente genera grandes complicaciones en el reciclaje y aumenta la contaminación ambiental. Esta solución permite resolver el problema del desperdicio de la materia de prima de la empresa y aprovechar una oportunidad del mercado, buscando un material alternativo que permita la sustitución de la madera en la fabricación de los carretes, en miras a una adecuada utilización de los residuos de tetra Pak.

Con el rediseño del carrete se busca mejorar el desarrollo productivo de la empresa y ayudar a elevar los niveles de productividad y competitividad empresarial de esta, pues actualmente se producen carretes con mucho desperdicio de materia prima (madera), no reutilizable dentro del proceso y altos costos de mano de obra y de proceso. La oportunidad de utilizar el nuevo material disponible en grandes cantidades, a un bajo costo y que puede ser recuperado en su totalidad, con cero desperdicios en el proceso y muy eficiente en utilización de mano de obra, permite obtener productos de mayor calidad, seguridad, eficiencia, economía y reducción del impacto ambiental.

La utilización del poli aluminio es una oportunidad para cerrar el ciclo del reciclado de tetra Pak, lo cual facilita la viabilidad de los proyectos de las cartoneras, pues es una solución innovadora que se puede constituir en una fuente de ingresos para familias de escasos recursos que se dedican al reciclaje.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el comportamiento mecánico del diseño de un carrete No 24, fabricado en el nuevo material reciclado de polietileno y aluminio (poli-aluminio) utilizado para empaque de cable eléctrico y telefónico.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ✓ Identificar con el fabricante de carretes los requerimientos con los cuales es fabricado el carrete No 24, y dar especificaciones cualitativas y cuantitativas de los requerimientos.
- ✓ Describir y evaluar el proceso de fabricación del carrete No 24, y obtener parámetros de fabricación.
- ✓ Mediante la metodología CAD/CAE realizar el proceso de ingeniería inversa del carrete No 24 para obtener un modelo computacional calibrado al modelo real del carrete.
- ✓ Realizar una propuesta optimizada de rediseño del carrete No 24.

#### **4. MARCO TEÓRICO**

El desarrollo del proyecto está enmarcado dentro de los parámetros de un diseño evolutivo, el cual se caracteriza por la mejora y la innovación de productos ya existentes basándose para ello en el rediseño de estos, garantizando el cumplimiento de los requerimientos del cliente o especificaciones de diseño y ofreciendo mayor calidad y eficiencia en el producto terminado.

La diferencia básica entre un diseño evolutivo y un diseño adaptativo está en que las necesidades del cliente se mantienen en el diseño evolutivo y lo que se pretende es mejorar el diseño en cuanto a los factores ambientales, tecnológicos, económicos y de seguridad, con el fin de ofrecer un producto que satisfaga tales necesidades a un mejor costo, mayor calidad y eficiencia tanto para el usuario como en el proceso de fabricación; mientras que el diseño adaptativo se realiza cuando a un producto existente se le deben hacer modificaciones para que se cumplan nuevos requerimientos de diseño impulsados por cambios en las necesidades del cliente.

En el diseño evolutivo se deben tener en cuenta algunos aspectos importantes en la determinación de un resultado de óptima calidad, tales como la verificación del diseño del proceso de producción, lo cual es posible de evaluar por medio de el análisis del valor y la matriz QFD.

El análisis del valor se basa en el diseño o rediseño de un producto o servicio, asegurar el mínimo costo de todas las funciones que el cliente desea y están de acuerdo a su presupuesto con todas las exigencias requeridas e identificar las oportunidades de mejora que conlleven a un diseño de soluciones.

La matriz QFD permite confrontar la información sobre aspectos o variables del producto obtenidas del cliente (requerimientos del producto), con las especificaciones de diseño, con el objetivo de definir las características de calidad del producto.

Para la verificación del diseño actual es indispensable el prototipado virtual rápido, que permita por medio de una simulación determinar parámetros importantes del diseño.



El análisis por elementos finitos es un método informático que permite predecir el comportamiento de los objetos reales y sus reacciones ante fuerzas, calor, vibración, etc., es decir, si funcionarán de la manera para la que fueron diseñados.

Este tipo de análisis tiene grandes ventajas para el diseño y trabajo de ingeniería, presentando las siguientes características:

- Es una herramienta avanzada de análisis y predicción, que permite crear diseños seguros, eficientes y económicos.
- Con el FEA, los ingenieros pueden analizar las tensiones y desplazamientos experimentados por piezas complejas al someterlas a cargas estáticas o dinámicas de naturaleza constante o variable en el tiempo.
- Analizar efectos de las deflexiones provocadas por cargas utilizando diversos modelos de materiales lineales y no lineales.
- El FEA puede emplearse también para analizar los efectos de las cargas térmicas sobre las piezas.

Esta técnica se denomina análisis, pero dentro del ciclo de diseño de un producto se emplea principalmente para predecir lo que ocurrirá cuando el producto se encuentre en funcionamiento.

El método de los elementos finitos funciona subdividiendo un objeto real en un gran número (miles o centenares de miles) de elementos con forma de bloques diminutos; El comportamiento de cada uno de estos pequeños elementos, que tienen una forma regular, puede predecirse fácilmente mediante unas ecuaciones matemáticas. El ordenador se encarga de agregar todos los comportamientos individuales para predecir el comportamiento de todo el objeto. El término 'finito' de la expresión 'análisis por elementos finitos' refleja la idea de que en un modelo de elementos finitos existe un número finito de elementos.

El método de elementos finitos se utiliza para predecir el comportamiento de las cosas ante prácticamente cualquier fenómeno físico:

- Tensión mecánica (análisis de tensión).

- Vibración mecánica.
- Transferencia de calor (conducción, convección y radiación).
- Flujo de fluidos (tanto líquidos como gaseosos).
- Diversos fenómenos eléctricos y magnéticos.
- Acústica.

## 5. METODOLOGÍA DE DISEÑO

El proceso de diseño en ingeniería se refiere a la serie de pasos o etapas que conllevan a la creación o innovación de un sistema, componente o proceso que permita la satisfacción de las necesidades determinadas aplicando las ciencias básicas e ingenieriles para convertir los recursos en los objetivos planteados.

Norton en 1995 define el diseño de ingeniería como el proceso de aplicar las diversas técnicas y principios científicos con el objeto de determinar un dispositivo, un proceso o un sistema con detalles suficientes que permitan su realización. El diseño puede ser simple o enormemente complejo, fácil o difícil, matemático o no matemático; y puede implicar un problema trivial o uno de gran importancia”.

Para realizar un diseño es necesario definir la estrategia a seguir que permita alcanzar el objetivo planteado con mayor eficiencia y calidad, y que garantice la satisfacción de las necesidades propuestas al inicio del proceso de diseño.

Existen diversas metodologías que definen el como del diseño de ingeniería convirtiéndose en la pieza clave en el proceso de diseño; la implementación de estas depende del diseñador y de las condiciones de trabajo expuestas al inicio de diseño, tales como tiempo y recursos, pues en cada caso en particular se debe aplicar la estrategia más adecuada para dicho fin, de igual forma todas las metodologías si son bien aplicadas convergen en el mismo punto, el cumplimiento del objetivo.

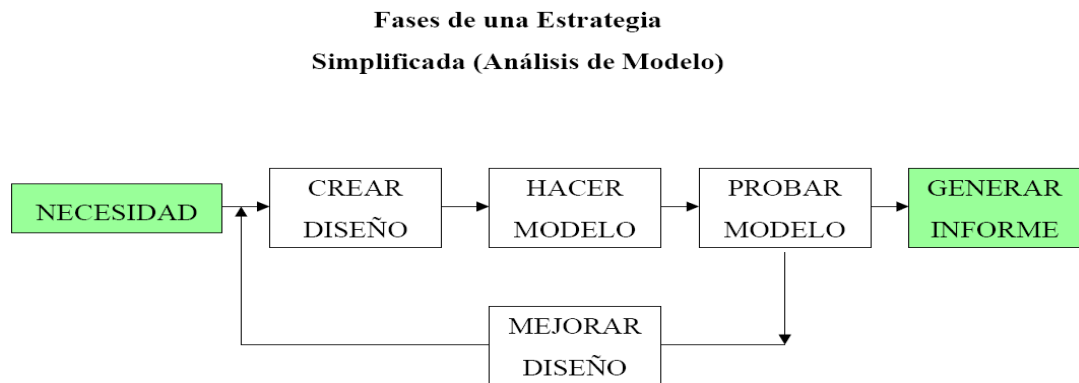
Las principales metodologías para seguir un proceso de diseño de ingeniería son:

- Estrategias Pahl y Beitz.
- Estrategia SEED.
- Estrategia simplificada.
- Estrategia sistemática.

De estas metodologías las más aplicadas comúnmente son la estrategia simplificada y la estrategia sistemática.

## 5.1 ESTRATEGIA SIMPLIFICADA

**Figura 1.** Estrategia simplificada.



Fuente: El diseño en ingeniería. Ciudad de buenos aires: Universidad Tecnológica Nacional, 2004. p.13.

### 5.1.1 Etapas de la estrategia simplificada.

✓ **Necesidad:** Esta estrategia parte de una necesidad que debe ser satisfecha por el diseño, Por tanto esta necesidad debe ser una necesidad específica que determine los parámetros más importantes a considerar en el diseño y permita a partir de esta identificar los criterios de diseño que se tendrán en cuenta para continuar con el proceso. En esta etapa se deben cumplir tres funciones específicas: Enunciar la necesidad, reconocer las restricciones y una retroalimentación continua.

✓ **Crear diseño:** A partir de la especificación del objetivo final se debe realizar un diseño de lo que sería, en esta etapa se define el diseño con base en las necesidades a satisfacer y los criterios de diseño, es decir una vez definido que se quiere hacer se diseña como lograrlo. Para obtener los mejores resultados en esta etapa, se aconseja generar ideas, evitar críticas innecesarias, puntualizar las restricciones y estipular criterios de análisis.

✓ **Hacer modelo:** Es necesario tener un modelo del diseño, ya sea físico (a escala), matemático o con ayuda de una herramienta computacional de dibujo; esto es importante porque permite visualizar e identificar deficiencias en el diseño planteado anteriormente.

✓ **Probar el modelo:** Esta es una de las etapas fundamentales del proceso de diseño, ya que las pruebas del modelo permiten confrontar el diseño con las condiciones de trabajo reales o muy próximas a estas, a las cuales estará

expuesto el diseño cuando este en funcionamiento; por tanto esta etapa debe realizarse con el mayor cuidado para obtener los resultados más confiables posibles y lograr un adecuado análisis del comportamiento del diseño. Para probar el modelo se pueden tener en cuenta los juicios valorativos y la comparación con otros modelos.

✓ **Mejorar el diseño:** La etapa anterior permite realizar una evaluación del diseño confrontando los resultados obtenidos con la necesidad planteada inicialmente, y esta comparación permite identificar las falencias y fortalezas del diseño que conlleven a definir las mejoras y cambios que se deben hacer para lograr la optimización de este; Se debe decidir si es necesario replantear los modelos para garantizar satisfacer los requerimientos, implementando un análisis exhaustivo de las respuestas de las pruebas. Esta evaluación debe realizarse las veces que sean necesarias hasta conseguir que el informe del diseño sea el deseado y se satisfagan completamente los requerimientos del diseño planteados por medio de las necesidades.

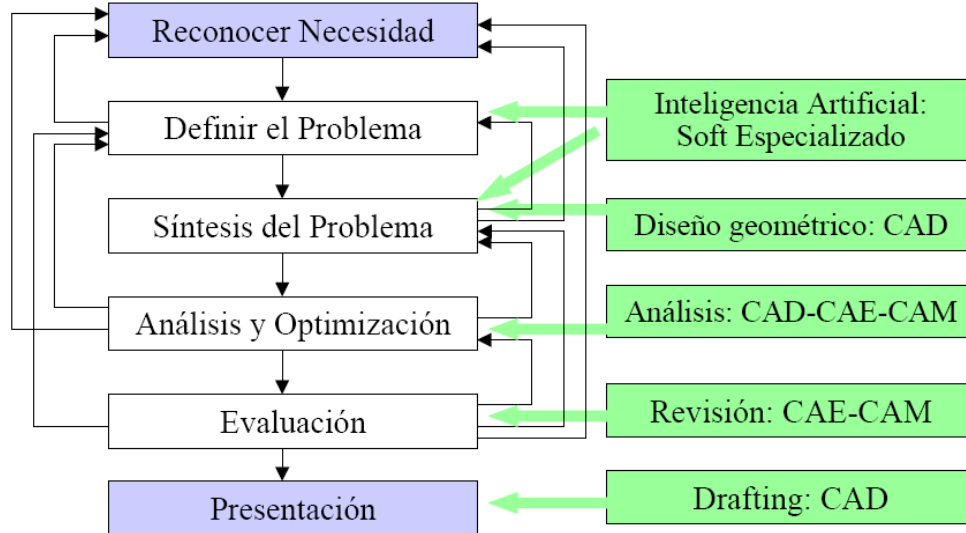
✓ **Generar informe:** El informe que se realiza a partir de los resultados de las pruebas del modelo debe ser muy detallado y completo, debe presentar con claridad cada uno de los resultados correspondientes a las pruebas realizadas, especificando los parámetros bajo los cuales se realizaron, de tal forma que se pueda efectuar una evaluación adecuada y determinar el rechazo o la aceptación del modelo.

## 5.2 ESTRATEGIA SISTEMÁTICA

Esta metodología de diseño presenta con más detalle cada una de las etapas a seguir que permiten alcanzar el objetivo, además de ello presenta una propuesta de herramientas que se deben implementar en cada una de las etapas, con el ánimo de facilitar el proceso y obtener una mayor garantía en la validación de los resultados.

Otro aspecto importante a destacar de esta metodología es la continua retroalimentación durante todo el proceso, lo cual disminuye la posibilidad de realizar grandes cambios al diseño una vez terminado, pues periódicamente se revisa que el modelo propuesto cumpla con los parámetros establecidos como base del diseño, lo cual no ocurre con la estrategia simplificada en la cual la retroalimentación se realiza únicamente al finalizar el diseño y las pruebas del este.

**Figura 2.** Estrategia sistemática.



Fuente: El diseño en ingeniería. Ciudad de buenos aires: Universidad Tecnológica Nacional, 2004. p.12.

### 5.2.1 Etapas de la estrategia sistemática.

✓ **Reconocer la necesidad:** Es indispensable identificar con claridad cual es la necesidad que se desea suplir con el diseño, para poder determinar con miras en esto los objetivos del diseño y garantizar una satisfacción total con el producto terminado.

✓ **Definir el problema:** Esta es quizás la etapa más importante en el proceso de diseño pues en esta etapa se definen los objetivos y las especificaciones de este con base en las necesidades que han sido identificadas previamente. Si hay algún error en esta etapa, este se vera reflejado en gran manera en todo el proceso y puede llegar a arruinarlo por completo, por lo cual se aconseja utilizar el apoyo de un software especializado para reducir las posibilidades de error en el desarrollo de esta fase.

✓ **Síntesis del problema:** Esta etapa depende de la definición del problema, ya que a partir de las especificaciones de diseño planteadas se crea el diseño geométrico; en este momento del proceso de diseño se debe realizar una retroalimentación para garantizar que la propuesta de diseño satisface las necesidades del cliente y es apta para continuar con el proceso. En esta etapa se recomienda utilizar una herramienta computacional de dibujo, que facilite el diseño del producto.

✓ **Análisis y optimización:** Se debe someter el modelo propuesto a todas las pruebas necesarias para determinar el cumplimiento de las especificaciones de diseño cuando se encuentra en condiciones de trabajo. Este análisis se puede realizar por medio de un software que permita simular el comportamiento del diseño frente a las condiciones determinadas, lo cual evita realizar un modelo real para someterlo a las pruebas necesarias.

✓ **Evaluación:** Esta etapa del proceso de diseño se realiza para optimizar el producto, relacionando las etapas de síntesis del problema y análisis y optimización; El objetivo consiste en mejorar la propuesta actual a partir de los resultados de la simulación del diseño, aplicando los correctivos necesarios al modelo por medio de la revisión CAE-CAD para garantizar que se cumplan con las necesidades y las especificaciones de diseño planteadas en la etapa de definición del problema.

✓ **Presentación:** Una vez se han hecho los correctivos necesarios y se ha obtenido el producto esperado se debe presentar el diseño final, en el cual se presente no solo las cualidades y ventajas que tenga, sino las debilidades y restricciones para garantizar su adecuado funcionamiento dentro de unas condiciones de trabajo específicas y un adecuado manejo.

El desarrollo del presente proyecto esta enmarcado dentro de los parámetros de un diseño evolutivo, el cual se caracteriza por la mejora y la innovación de productos ya existentes basándose para ello en el rediseño de estos, garantizando el cumplimiento de los requerimientos del cliente o especificaciones de diseño y ofreciendo mayor calidad y eficiencia en el producto terminado.

La diferencia básica entre un diseño evolutivo y un diseño adaptativo esta en que las necesidades del cliente se mantienen en el diseño evolutivo y lo que se pretende es mejorar el diseño en cuanto a los factores ambientales, tecnológicos, económicos y de seguridad, con el fin de ofrecer un producto que satisfaga tales necesidades a un mejor costo, mayor calidad y eficiencia tanto para el usuario como en el proceso de fabricación; mientras que el diseño adaptativo se realiza cuando a un producto existente se le deben hacer modificaciones para que se cumplan nuevos requerimientos de diseño impulsados por cambios en las necesidades del cliente.

Con el rediseño del carrito se busca mejorar el desarrollo productivo de la empresa y ayudar a elevar los niveles de productividad y competitividad empresarial de esta, pues actualmente se producen carritos con mucho desperdicio de materia prima (madera), no reutilizable dentro del proceso y altos costos de mano de obra y de proceso. La oportunidad de utilizar el nuevo

material disponible en grandes cantidades, a un bajo costo y que puede ser recuperado en su totalidad, con cero desperdicios en el proceso y muy eficiente en utilización de mano de obra, permite obtener productos de mayor calidad, seguridad, eficiencia, economía y reducción del impacto ambiental.

En el diseño evolutivo se deben tener en cuenta algunos aspectos importantes en la determinación de un resultado de óptima calidad, tales como la verificación del diseño del proceso de producción, lo cual es posible de evaluar por medio de el análisis del valor y la matriz QFD.

El análisis del valor se basa en el diseño o rediseño de un producto o servicio, asegurar el mínimo costo de todas las funciones que el cliente desea y están de acuerdo a su presupuesto con todas las exigencias requeridas e identificar las oportunidades de mejora que conlleven a un diseño de soluciones.

La matriz QFD permite confrontar la información sobre aspectos o variables del producto obtenidas del cliente (requerimientos del producto), con las especificaciones de diseño, con el objetivo de definir las características de calidad del producto.

Para la verificación del diseño actual es indispensable el prototípado virtual rápido, que permita por medio de una simulación determinar parámetros importantes del diseño.

El análisis por elementos finitos es un método informático que permite predecir el comportamiento de los objetos reales y sus reacciones ante fuerzas, calor, vibración, etc., es decir, si funcionarán de la manera para la que fueron diseñados. Esta técnica se denomina análisis, pero dentro del ciclo de diseño de un producto se emplea principalmente para predecir lo que ocurrirá cuando el producto se encuentre en funcionamiento.



## 6. MATRIZ DE CALIDAD QFD

Es necesario implementar una metodología que permita focalizar el diseño de productos en las necesidades y requerimientos del cliente, lo cual es posible de realizar mediante una matriz QFD en la cual se establezcan las relaciones entre las especificaciones de diseño del producto y las herramientas y parámetros con que se cuentan para la fabricación de este.

La matriz QFD permite confrontar la información sobre aspectos o variables del producto obtenidas del cliente (requerimientos del producto), con las especificaciones de diseño, con el objetivo de definir las características de calidad del producto.

Para determinar estas especificaciones es necesario realizar un trabajo de campo en el cual se tenga relación directa con el fabricante de carretes para determinar con exactitud los requerimientos y parámetros de diseño.

### 6.1 DEFINICIÓN

QFD viene de la inglé ***“Quality Function Deployment”*** que traduce despliegue de la función de calidad; es un sistema organizado para diseñar o rediseñar productos, que recoge la voz del cliente y la traduce a características de diseño y operación que permitan satisfacer las demandas y expectativas del mercado actual.

El QFD es un elemento clave de distintas actividades, como la gestión de la calidad, ya que contribuye en gran manera con la optimización del producto estudiado, permitiendo que la empresa se ubique dentro de los más altos estándares de calidad, y lo más importante, logrando ganar terreno frente a la competencia al ofrecerle al cliente un mayor cubrimiento de sus necesidades.

Esta herramienta permite identificar las necesidades de los clientes, orientar la integración de equipos de diseño y fabricación de productos, y, en un proceso de mejora continua, satisfacer los requerimientos del mercado con costos decrecientes, menor tiempo de producción, altos niveles de calidad y otros criterios competitivos.

## **6.2 OBJETIVOS**

La matriz de calidad tiene dos objetivos principales:

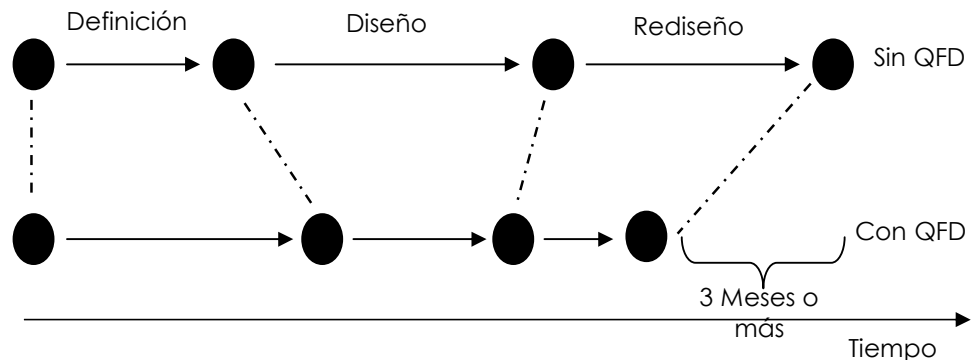
- Satisfacer las necesidades de los clientes por medio de una metodología que permita traducir estas necesidades en especificaciones de diseño medibles que permitan ser evaluadas y estudiadas fácilmente.
- Incrementar la posibilidad de acertar en el diseño o rediseño del producto, lo cual se consigue dedicando tiempo en la definición de las especificaciones técnicas que se van a considerar en el producto, para evitar tener que hacer cambios y replanteamientos en una etapa más avanzada del diseño.

## **6.3 ESTRUCTURA DEL QFD**

- Necesidades de los clientes y la importancia de cada una de estas.
- Situación actual del producto.
- Meta a la cual se pretende llegar para alcanzar la satisfacción de las necesidades.
- Determinar las especificaciones de diseño.
- Correlación entre las especificaciones de diseño y las necesidades de los clientes.
- Evaluación de cada una de las especificaciones de diseño.
- Identificación de las oportunidades de mejora en cada una de las especificaciones de diseño de acuerdo a las necesidades de los clientes.

## 6.4 VENTAJAS

**Figura 3.** Ventajas de la matriz QFD



Fuente: Despliegue de la función de calidad Q.F.D. [en línea]. Oaxaca México: Instituto de innovación y calidad gubernamental, 2000. [Consultado 2 de Abril, 2008]. Disponible en Internet: [http://www.eoazaca.gob.mx/innovacg/descargar\\_archivo.php?download=QUALITY%20FUNCTION%20DEPLOYMENT.doc&c=CALIDAD%20PARA%20TI](http://www.eoazaca.gob.mx/innovacg/descargar_archivo.php?download=QUALITY%20FUNCTION%20DEPLOYMENT.doc&c=CALIDAD%20PARA%20TI). p 5.

- **Herramienta efectiva de Marketing:** los requerimiento del cliente no son solo la necesidad de estos sino que representan la tendencia del mercado, y al sintetizarlos y construir la matriz se logra una mayor comprensión de los clientes actuales y potenciales, y de sus exigencias y expectativas.
- **Ventajas competitivas y fomento de innovación:** La identificación de las especificaciones de diseño además de responder a las necesidades de los clientes, permite realizar diseños innovadores, detectar ventajas competitivas que pueden ser explotadas y que posiblemente conlleven a establecer fallas en el diseño actual.
- **Determinación de las prioridades de mejora continua:** Esta herramienta permite identificar las variables que determinan la calidad de un producto o servicio las cuales representan las prioridades de la mejora continua.
- **Análisis de costos y beneficios:** Los resultados que se obtienen del análisis de la relación entre las necesidades del cliente y las especificaciones de diseño también permite mejorar el rendimiento económico y financiero de la empresa respecto del producto estudiado.

## 6.5 DESARROLLO DE LA MATRIZ QFD

Para lograr el adecuado desarrollo de la matriz de calidad del carrete estudiado, a través de la metodología QFD, se implementó la propuesta de la Asociación latinoamericana de QFD y se tuvo un contacto directo con los proveedores y los clientes de este producto, trabajando con las empresas RSI LTDA y FECOMECA como proveedores, y CENTELSA como consumidor, garantizando que los resultados obtenidos consideren los aspectos más importantes para cada una de las dos posiciones involucradas en este producto.

Por medio de una consulta que se realizó a los expertos en el campo de la producción de los carretes se logró identificar las principales necesidades a tener en cuenta en el diseño de estos productos, de tal forma que satisfagan completamente las necesidades del cliente optimizando su diseño para alcanzar los niveles de calidad deseados.

Esta consulta arrojó una gran cantidad de variables de las cuales se seleccionaron las que representen necesidades con alto nivel de importancia y posibilidad de mejorar el producto terminado; Estas fueron agrupadas en 6 categorías de necesidad superior, obteniendo un total de 20 necesidades generales; las cuales se distribuyeron de la siguiente forma:

**6.5.1 Proceso de fabricación.** En este grupo se presentan las variables que están relacionadas con el proceso de fabricación del carrete, involucrando aspectos de eficiencia y economía.

- El carrete es de fácil ensamble.
- El carrete requiere corto tiempo de fabricación.
- El carrete es económico.

**6.5.2 Manejo del carrete.** Hace referencia a las variables que intervienen en la manipulación del carrete.

- El carrete es liviano.
- El carrete es fácil de transportar.

- El carrete facilita el empaque del producto.
- El carrete permite realizar pruebas al producto.

**6.5.3 Calidad del carrete.** Estas variables contribuyen o afectan la calidad del carrete, relacionando directamente la vida útil de este.

- El carrete es duradero.
- El carrete presenta poca absorción de agua.
- El carrete es resistente a la corrosión.
- El carrete soporta inadecuadas condiciones de transporte.

**6.5.4 Condiciones de trabajo.** En esta categoría se encuentran variables que permiten analizar el comportamiento mecánico del carrete y establecer las condiciones óptimas de trabajo de este producto.

- El carrete es rígido.
- El carrete es resistente al impacto.
- El carrete soporta caídas.
- El carrete soporta cargas considerables de acuerdo a su referencia.
- El carrete soporta altas temperaturas.

**6.5.5 Protección del producto empacado en él.** Estas son las variables que relacionan la utilidad del producto, garantizando que el producto empacado en él se conserve y no se limiten sus funciones.

- El carrete no afecta la calidad del producto empacado en él.

**6.5.6 Estética del carrete.** Son las variables relacionadas con el aspecto físico del carrete.

- ✓ El carrete tiene una apariencia agradable.

**6.5.7 Impacto ambiental.** En esta categoría se encuentran las variables que tienen relación con el medio ambiente, y que contribuyen de alguna u otra forma con su preservación.

- El carrete es recuperable.
- El carrete es reciclable.

**6.5.8 Obtención de los datos.** Para determinar la importancia de cada una de las necesidades mencionadas anteriormente se realizó una encuesta tanto a los proveedores como a los clientes del carrete ya mencionados, en la cual se cuestionaba el nivel de importancia de cada necesidad, evaluado en un rango de 1 a 5, siendo 5 el nivel más importante y 1 el de menor importancia. A continuación se presenta la encuesta que fue realizada.


**Tabla 1.** Encuesta de evaluación de las necesidades del carrete.

No	NECESIDAD	Importancia de 1 a 5
1	El carrete es fácil de reparar	
2	El carrete es liviano	
3	El carrete no le afecta el agua.	
4	El carrete es muy duradero	
5	El carrete es fácil de transportar	
6	El carrete es rígido	
7	El carrete es resistente al impacto	
8	El carrete soporta caídas	
9	El carrete soporta cargas considerables según su referencia.	
10	El carrete es resistente a la corrosión	
11	El carrete no afecta la integridad del producto empacado en el	
12	El carrete facilita el empaque del producto	
13	El carrete permite realizar pruebas al producto	
14	El carrete soporta altas temperaturas	
15	El carrete es de fácil ensamble.	
16	El carrete requiere tiempos de fabricación cortos	
17	El carrete es económico	
18	El carrete se fabrica en material reciclable.	
19	El carrete es visualmente estético	
20	El carrete esta protegido contra las bacterias	

Los resultados obtenidos se tomaron como base para el desarrollo de la matriz de calidad QFD; los datos obtenidos de las empresas proveedoras del carrete, RSI LTDA y FECOMECA, se promediaron y se asignaron como el peso ponderado en cada una de las necesidades, y los datos obtenidos de CENTELSA se tomaron como la evaluación de los clientes a cada necesidad.

La casa de la calidad obtenida al aplicar la metodología de la asociación latinoamericana de QFD se presenta a continuación en la tabla 2, y los parámetros de diseño enumerados en esta se especifican en la sección 2.5.9 en su respectivo orden.


Tabla 2. Casa de la calidad.

Asociación Latinoamericana de QFD				Matriz de relaciones: carrete para empaque de cable No 24		Estratos de Diseño										<div><div>Eval de clientes</div><div>Ponderado</div><div>ponderada</div><div>absoluta</div><div>absoluta</div></div>								
Necesidad Superior		N o				Necesidad del Cliente		Calificación ponderada		1	2	3	4	5	6						7	8	9	10
								82,5%		14,4%	14,4%	12,9%	8,4%	20,7%	7,0%						0,9%	6,4%	7,1%	7,7%
						Peso Ponderado																		
Proceso de fabricación		1		Fácil ensamble	1,3%	3	0	0	0	3	0	0	3	9	9	9	70%	1,3%	0,9%	0,4%	2,3%			
		2		Tiempo de fabricación	1,3%	1	3	0	0	9	0	0	9	9	9	3	70%	1,3%	0,9%	0,4%	2,3%			
		3		Economico	5,3%	9	1	0	0	9	0	0	9	9	9	1	90%	5,3%	4,7%	0,5%	3,0%			
Manejo		4		Liviano	2,6%	9	3	0	0	3	1	0	1	0	0	0	90%	2,6%	2,4%	0,3%	1,5%			
		5		Facilidad de transporte	6,6%	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90%	6,6%	5,9%	0,7%	3,8%			
		6		Permite realizar pruebas en el	6,6%	0	0	0	0	1	0	0	0	3	0	0	100%	6,6%	6,6%	0,0%	0,0%			
		7		Facilita el empaque del producto	6,6%	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100%	6,6%	6,6%	0,0%	0,0%			
Calidad		8		Duradero	3,9%	0	9	3	0	3	3	0	0	0	0	1	70%	3,9%	2,8%	1,2%	6,8%			
		9		Tolerancia al agua	6,6%	0	9	0	0	3	0	0	0	0	0	0	80%	6,6%	5,3%	1,3%	7,5%			
		10		Resistente a la corrosión	6,6%	0	9	0	0	3	0	0	0	0	0	0	80%	6,6%	5,3%	1,3%	7,5%			
		11		Que soporte inadecuadas	5,3%	3	0	1	1	0	0	0	0			0	70%	5,3%	3,7%	1,6%	9,0%			
condiciones de trabajo		12		Rigido	6,6%	3	0	9	0	9	3	0	0	0	0	3	80%	6,6%	5,3%	1,3%	7,5%			
		13		Resistente al impacto	6,6%	3	0	3	9	3	0	0	0	0	0	3	90%	6,6%	5,9%	0,7%	3,8%			
		14		Soporta caídas	5,3%	3	0	3	9	3	0	0	0	0	0	3	70%	5,3%	3,7%	1,6%	9,0%			
		15		Soporta cargas considerables	6,6%	3	0	9	0	1	9	0	0	0	0	0	70%	6,6%	4,6%	2,0%	11,3%			
		16		Tolerante a altas temperaturas	1,3%	0	0	0	0	1	0	9	0	0	0	0	90%	1,3%	1,2%	0,1%	0,8%			
Protección del producto empaquetado		17		No afecta la integridad del producto	6,6%	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	100%	6,6%	6,6%	0,0%	0,0%			
Estetico		18		El carrete es visualmente estetico	3,9%	0	0	0	0	3	0	0	1	1	0	0	100%	3,9%	3,9%	0,0%	0,0%			
Impacto ambiental		19		Recupeable	5,3%	1	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	70%	5,3%	3,7%	1,6%	9,0%			
		20		Reciclable	5,3%	1	0	0	0	3	0	0	3	0	0	0	50%	5,3%	2,6%	2,6%	15,0%			
						100,0%																		
						Peso ponderado OK		1,9	1,9	1,7	1,1	2,8	0,9	0,1	0,9	0,9	1,0	81,5%	100,0%	82,5%	17,5%	100,0%		
						Unidades		Masa Total	Humedad	Deformación	Factor de	Materiales	Carga del	Temperatura	Costo de	Tiempo de	Número de							
								Kg	%	%	%	Propiedades	Kg	°C	%	horas	#							
						Dirección de Mejora		Menores	Menores	Menores	Mayores	Nominales	Mayor	Mayor	Menor	Menor	Menor							
						Nivel actual		408	20	100	100%	Metal-madera	6850	40	100	16	123							
						Meta		408	14	80	120%	Metal-poli	7000	45	70	12	77							
						Dificultad		70%	50%	45%	60%	90%	60%	50%	70%	70%	80%							



A continuación en la tabla 3 se presentan las necesidades establecidas según su clasificación y su respectivo peso ponderado obtenido a partir de la encuesta como se menciona anteriormente.

**Tabla 3.** Necesidades y su respectivo peso ponderado.

		Matriz de relaciones: carrete para empaque de cable No 24		Calificación ponderada actual
				82,4%
Necesidad Superior	No	Necesidad del Cliente	Peso Ponderado	
Proceso de fabricación	1	Fácil ensamble	1,3%	
	2	Tiempo de fabricación	1,3%	
	3	Economico	1,3%	
Manejo	4	Liviano	2,6%	
	5	Facilidad de transporte	6,6%	
	6	Permite realizar pruebas en el producto	6,6%	
Calidad	7	Facilita el empaque del producto	6,6%	
	8	Duradero	3,9%	
	9	Tolerancia al agua	6,6%	
condiciones de trabajo	10	Resistente a la corrosión	6,6%	
	11	Que soporte inadecuadas condiciones de	1,3%	
	12	Rígido	6,6%	
Protección del producto empacado en él	13	Resistente al impacto	6,6%	
	14	Soporta caídas	1,3%	
	15	Soporta cargas considerables según su	6,6%	
Estético	16	Tolerante a altas temperaturas	1,3%	
	17	No afecta la integridad del producto	6,6%	
	18	El carrete es visualmente estético	3,9%	
Impacto ambiental	19	Recupeable	1,3%	
	20	Reciclable	1,3%	
			100,0%	

A partir de las 20 necesidades identificadas en este proceso, se determinaron 10 parámetros de diseño, los cuales transforman las necesidades del cliente en especificaciones de diseño, relacionándolas con las herramientas y aspectos que se deben tener en cuenta en la producción del carrete.

#### 6.5.9 Parámetros de diseño.

✓ **Masa total:** Es la masa total del carrete.

✓ **Humedad:** % de absorción de agua del material del carrete.

✓ **Deformación:** Es la deformación que se podría presentar en el carrete por efectos externos como exceso de cargas y/o caídas.

✓ **Energía absorbida en prueba de impacto de los materiales que componen el carrete:** Determina la resistencia al impacto del material, de acuerdo a la capacidad de absorción de energía.

✓ **Material:** Material en que es fabricado el carrete (teniendo en cuenta las propiedades mecánicas).

✓ **Carga del cable:** El peso del cable que sea empacado en el carrete.

✓ **Temperatura:** Es la temperatura que soporta el carrete.

✓ **Costo de fabricación por unidad:** Es el costo total por cada unidad del producto fabricado.

✓ **Tiempo de producción:** Tiempo total que se requiere para la producción del carrete.

✓ **Numero de piezas a ensamblar:** Numero de piezas que se deben ensamblar para obtener el producto terminado.

Los parámetros de diseño deben considerar todas las necesidades presentadas anteriormente, definiendo los criterios de diseño adecuados que contribuyan a cada una de estas; Para determinar la importancia de cada uno de estos parámetros, y categorizarlos de acuerdo a su nivel de importancia y contribución en la optimización del diseño, se confrontan con cada necesidad del cliente estableciendo su grado de relación entre fuerte (9), media (3), ligera (1) o ninguna (0), como se presenta en la tabla 4.

**Tabla 4.** Matriz de relaciones.

Asociación Latinoamericana de QFD				Criterios de Diseño										
		Matriz de relaciones: carrete para empaque de cable No 24		Calificación ponderada	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
				82,5%	14,4%	14,4%	12,9%	8,4%	20,7%	7,0%	0,9%	6,4%	7,1%	7,7%
Necesidad Superior	No	Necesidad del Cliente	Peso Ponderado											
Proceso de fabricación	1	Fácil ensamble	1,3%	3	0	0	0	3	0	0	3	9	9	
	2	Tiempo de fabricación	1,3%	1	3	0	0	9	0	0	9	9	3	
	3	Economico	1,3%	9	1	0	0	9	0	0	9	9	1	
Manejo	4	Liviano	2,6%	9	3	0	0	3	1	0	1	0	0	
	5	Facilidad de transporte	6,6%	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Calidad	6	Permite realizar pruebas en el producto	6,6%	0	0	0	0	1	0	0	0	3	0	
	7	Facilita el empaque del producto	6,6%	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	8	Duradero	3,9%	0	9	3	0	3	3	0	0	0	1	
	9	Tolerancia al agua	6,6%	0	9	0	0	3	0	0	0	0	0	
	10	Resistente a la corrosión	6,6%	0	9	0	0	3	0	0	0	0	0	
condiciones de trabajo	11	Que soporte inadecuadas condiciones de	1,3%	3	0	1	1	0	0	0			0	
	12	Rigido	6,6%	3	0	9	0	9	3	0	0	0	3	
	13	Resistente al impacto	6,6%	3	0	3	9	3	0	0	0	0	3	
	14	Soporta caidas	1,3%	3	0	3	9	3	0	0	0	0	3	
	15	Soporta cargas considerables según su	6,6%	3	0	9	0	1	9	0	0	0	0	
Protección del producto empaquetado en él	16	Tolerante a altas temperaturas	1,3%	0	0	0	0	1	0	9	0	0	0	
	17	No afecta la integridad del producto	6,6%	0	3	0	0	0	0	0	0	0	1	
	18	El carrete es visualmente estetico	3,9%	0	0		0	3	0	0	1	1	0	
Impacto ambiental	19	Recupeable	1,3%	1	0	0	0	3	0	0	0	0	3	
	20	Reciclable	1,3%	1	0	0	0	3	0	0	3		0	
			100,0%											
			Peso ponderado	1,9	1,9	1,7	1,1	2,8	0,9	0,1	0,9	0,9	1,0	

Es necesario caracterizar completamente los parámetros de diseño establecidos, de tal forma que se facilite el análisis de los resultados de la matriz, identificando con facilidad las metas a las que se pueden llegar en cada caso, de acuerdo al nivel actual del parámetro; y una vez se hallan localizado las especificaciones claves en el diseño encontrar la dirección que conlleve a la máxima mejora del producto.

**Tabla 5.** Especificaciones de diseño.

100,0%										
Peso ponderado OK	1,9	1,9	1,7	1,1	2,8	0,9	0,1	0,9	0,9	1,0
	Masa Total	Humedad	Deformación	Factor de tenacidad de fractura, Kic	Material	Carga del Cable	Temperatura	Costo de fabricación	Tiempo de Producción	Numero de Piezas a ensamblar
Unidades	Kg	%	%	%	Propiedades	Kg	°C	%	horas	#
Dirección de Mejora	Menor es mejor	Menor es mejor	Menor es mejor	Mayor es mejor	Nominales	Mayores	Mayores mejor	Menores mejor	Menores mejor	Menores mejor
Nivel actual	408	20	100	100%	Metal-madera	6850	40	100	16	123
Meta	408	14	80	120%	Metal-poli aluminio	7000	45	70	12	77
Dificultad	70%	50%	45%	60%	90%	60%	50%	70%	70%	80%

## 6.6 ANÁLISIS Y RESULTADOS

En la tabla 6 se presentan aspectos muy importantes para el análisis de la matriz, pues además de mostrar las necesidades más importantes para los clientes (evaluación de los clientes) y la evaluación total de estas (evaluación ponderada), relacionando el peso ponderado asignado por los proveedores y la importancia para los clientes de cada necesidad, se presenta la ganancia porcentual que se tendría en cada necesidad si se mejora al máximo (brecha absoluta ponderada), y la contribución de cada una de estas mejoras a la optimización del diseño en su totalidad (brecha absoluta relativa), considerando estos parámetros.


En este caso las necesidades más importantes de acuerdo a la evaluación ponderada son:

- El carrete es fácil de transportar.
- El carrete es rígido.
- El carrete es resistente al impacto.

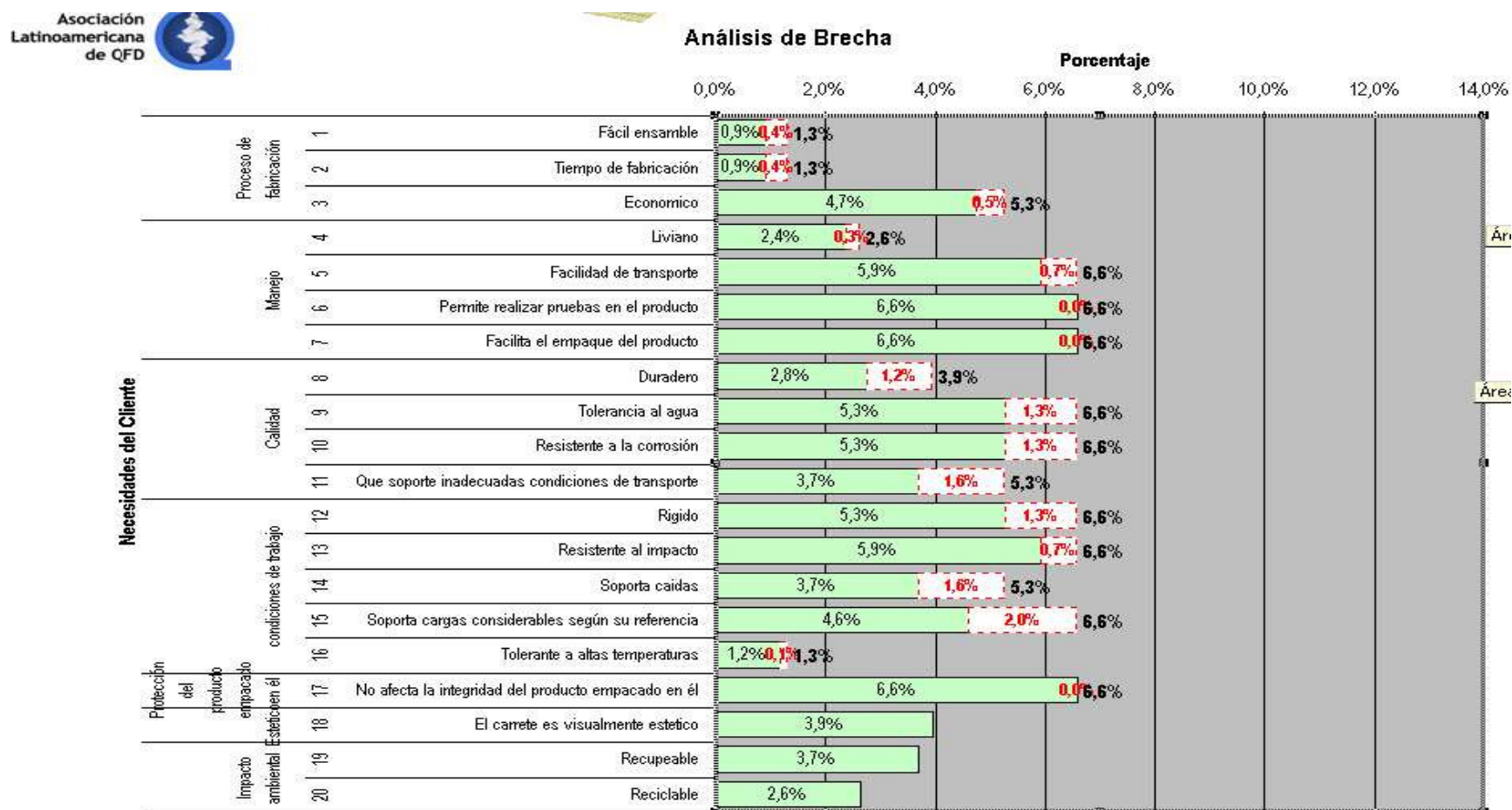
- El carrito soporta cargas considerables según su referencia.
- El carrito es económico.

En estas necesidades se pueden ganar 5.1 puntos porcentuales si se mejora al máximo la evaluación en cada una de ellas.

**Tabla 6.** Resultados de la matriz de calidad.

<div>Asociación Latinoamericana de QFD</div> <div></div>		Matriz de relaciones: carrete para empaque de cable No 24						
Necesidad Superior	No	Necesidad del Cliente	Eval de clientes	Peso Ponderado	Eval ponderada	absoluta ponderada	absoluta relativa	
Proceso de fabricación	1	Fácil ensamble	70%	1,3%	0,9%	0,4%	2,3%	
	2	Tiempo de fabricación	70%	1,3%	0,9%	0,4%	2,3%	
	3	Economico	90%	5,3%	4,7%	0,5%	3,0%	
Manejo	4	Liviano	90%	2,6%	2,4%	0,3%	1,5%	
	5	Facilidad de transporte	90%	6,6%	5,9%	0,7%	3,8%	
	6	Permite realizar pruebas en el producto	100%	6,6%	6,6%	0,0%	0,0%	
	7	Facilita el empaque del producto	100%	6,6%	6,6%	0,0%	0,0%	
Calidad	8	Duradero	70%	3,9%	2,8%	1,2%	6,8%	
	9	Tolerancia al agua	80%	6,6%	5,3%	1,3%	7,5%	
	10	Resistente a la corrosión	80%	6,6%	5,3%	1,3%	7,5%	
	11	Que soporte inadecuadas condiciones de	70%	5,3%	3,7%	1,6%	9,0%	
condiciones de trabajo	12	Rígido	80%	6,6%	5,3%	1,3%	7,5%	
	13	Resistente al impacto	90%	6,6%	5,9%	0,7%	3,8%	
	14	Soporta caidas	70%	5,3%	3,7%	1,6%	9,0%	
	15	Soporta cargas considerables según su	70%	6,6%	4,6%	2,0%	11,3%	
	16	Tolerante a altas temperaturas	90%	1,3%	1,2%	0,1%	0,8%	
Protección del producto empaquetado en él	17	No afecta la integridad del producto	100%	6,6%	6,6%	0,0%	0,0%	
Estetico	18	El carrete es visualmente estetico	100%	3,9%	3,9%	0,0%	0,0%	
Impacto ambiental	19	Recupeable	70%	5,3%	3,7%	1,6%	9,0%	
	20	Reciclable	80%	5,3%	2,6%	2,6%	15,0%	
			81,5%	100,0%	82,5%	17,5%	100,0%	

**Figura 4.** Puntos porcentuales a ganar con cada necesidad.

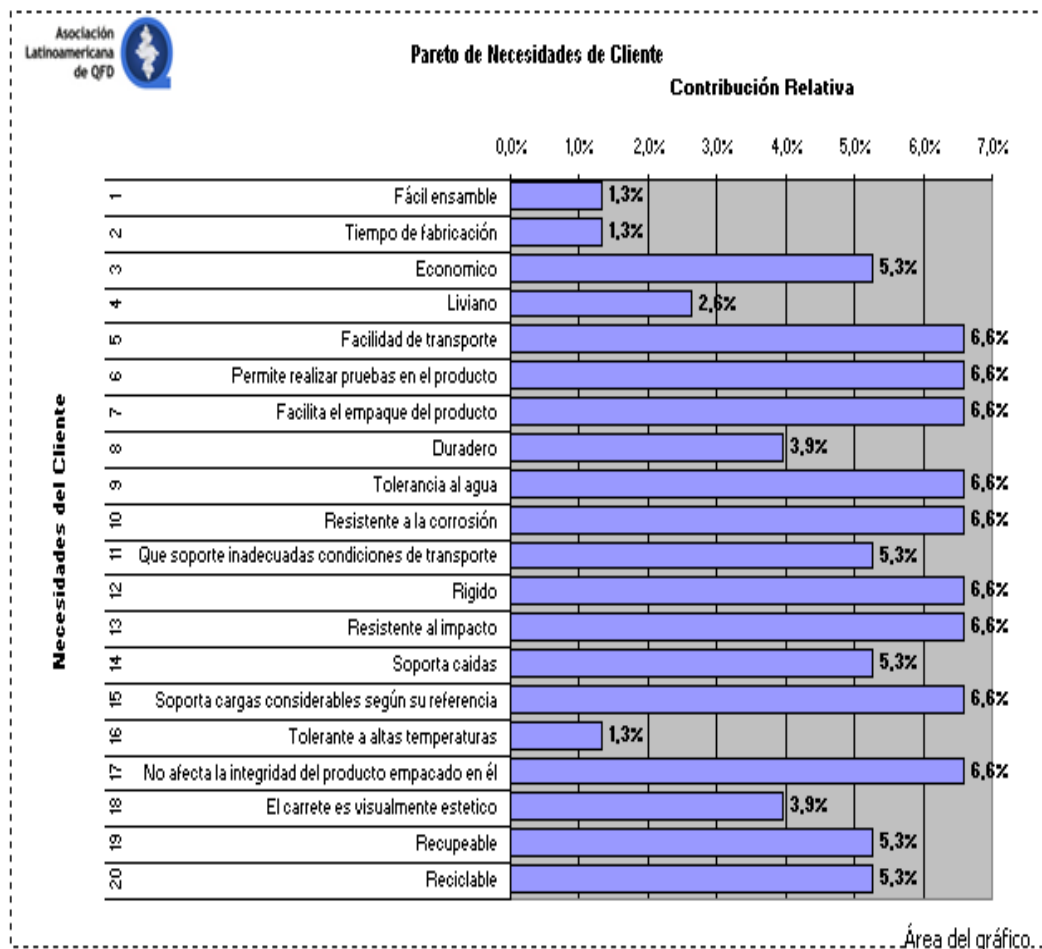




De igual forma si se logra aumentar el nivel en cada una de estas necesidades prioritarias se podría aumentar la satisfacción de la necesidad en un total de 29.4%.

Estos resultados se pueden apreciar con mayor claridad en la figura 5 en la que se muestra cual es la necesidad más importante tanto para el cliente como para el proveedor del carrete.

**Figura 5.** Importancia de las necesidades.



La necesidad más importante se puede relacionar con los parámetros de diseño en la matriz de relaciones, en el cual se puede identificar con que parámetro se puede mejorar de forma directa. En este caso los parámetros de diseño que se relacionan fuertemente con las necesidades de mayor peso son:

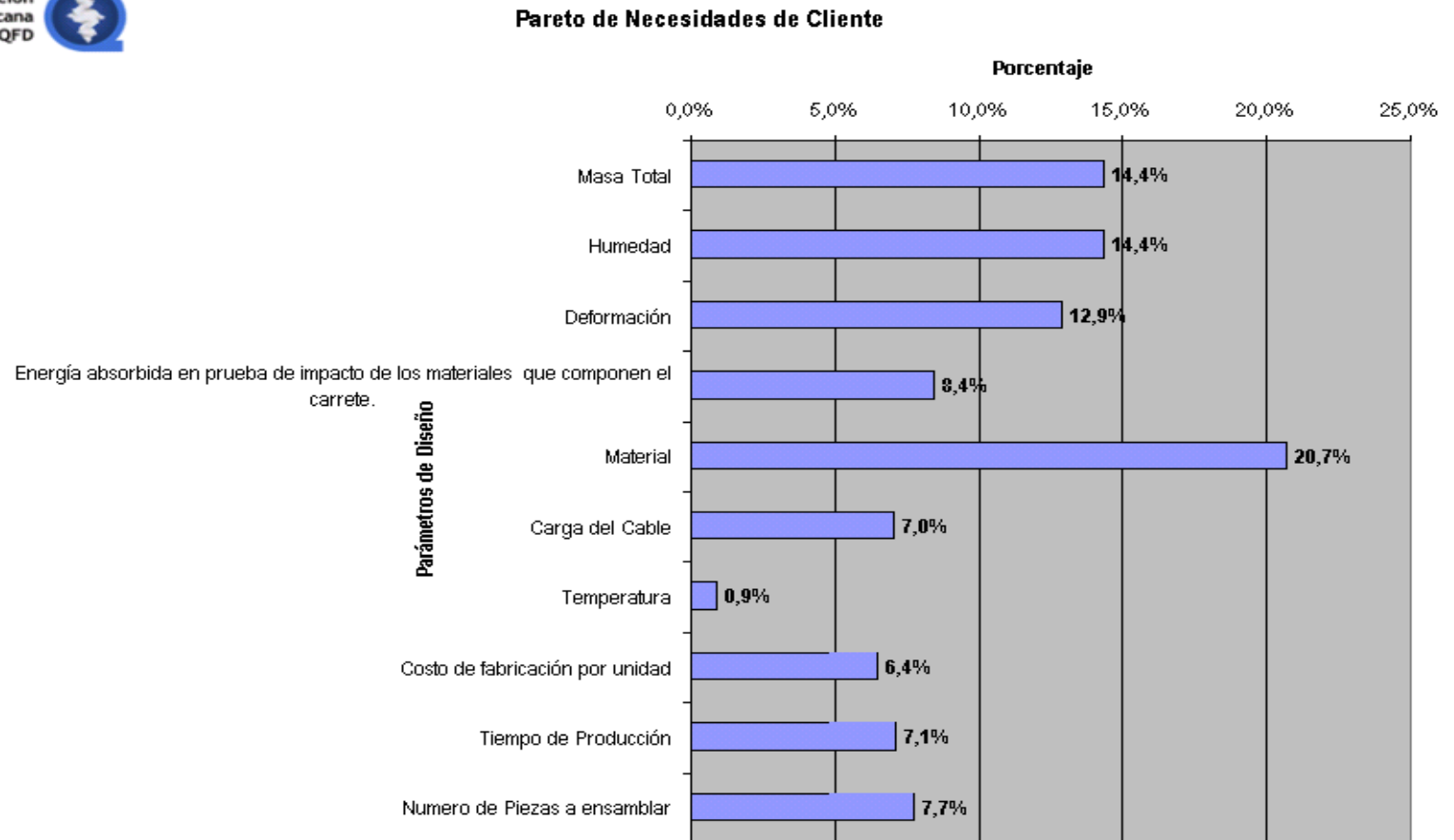
- Deformación.
- Energía absorbida por el material en prueba de impacto.
- Masa total.
- Material.
- Numero de piezas a ensamblar.

Estos parámetros de diseño se pueden evaluar con facilidad en la tabla 4 de especificaciones de diseño, en la cual se obtiene que las mejores opciones para maximizar el requerimiento de la necesidad se logra incrementando la energía absorbida por el material y disminuyendo la deformación, la masa total del carrete, el número de piezas a ensamblar, y en este caso cambiando el material de fabricación del carrete por el poli aluminio, lo cual seria una gran opción para maximizar la funcionalidad del carrete optimizando sus condiciones de trabajo y alcanzando la satisfacción en las principales necesidades de los clientes; El cambio del material del carrete esta muy relacionado con cada uno de estos aspectos ya que permite incrementar la economía al disminuir los problemas que presenta trabajar con la madera (mencionados anteriormente), disminuir el número de piezas a ensamblar, lo cual se retribuye en menor tiempo de producción y facilidad de fabricación y garantizar el optimo funcionamiento del carrete en la industria.

En la figura 6 se puede identificar cual es el parámetro de diseño que relaciona más necesidades del cliente por tanto es un punto fuerte para trabajar y potencializar la calidad del producto, en este caso el material es el parámetro de mayor influencia en el diseño de los carretes con un 28.7%. Nuevamente este se puede estudiar con ayuda de la tabla 4 de las especificaciones de diseño, la cual indica que el cambio de material de fabricación de l carrete de metal – madera a metal – poli aluminio.



**Figura 6.** Influencia de los parámetros de diseño.



Con estos resultados arrojados por la matriz de calidad es posible orientar con mayor seguridad el diseño del carrete de acuerdo a los aspectos claves tanto para los fabricantes como para los clientes, en este caso los parámetros de mayor relevancia son el material, la masa total del carrete, la deformación, la humedad y la energía absorbida por el carrete en la prueba de impacto, los cuales se relacionan con las necesidades de rigidez, resistencia al impacto, facilidad de transporte, economía, humedad del carrete y soportar las cargas considerables según la referencia del carrete principalmente, y se pueden conseguir con un adecuado rediseño del producto en el cual se potencialicen estos factores conllevando a un carrete mucho más óptimo en sus condiciones de trabajo.

## 7. PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CARRETE MIXTO NO 24

Para determinar el proceso de fabricación del carrete mixto metal-poli aluminio es necesario conocer el proceso del carrete mixto metal-madera, y a partir de este identificar los cambios necesarios para establecer el nuevo procedimiento de fabricación para este carrete de madera y poli aluminio.

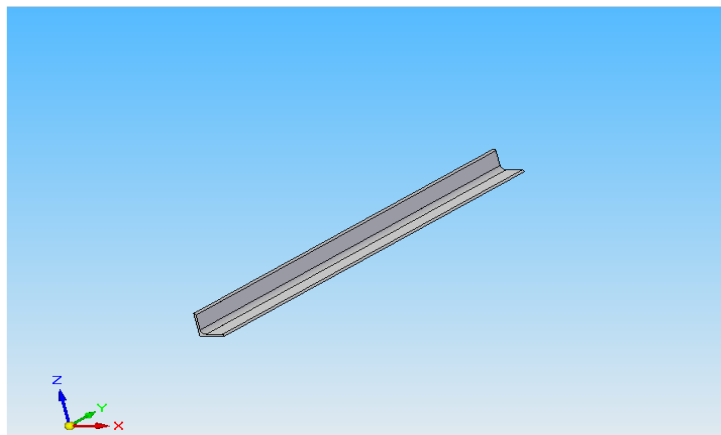
El proceso de fabricación para un carrete mixto con estructura metálica y paredes de madera se realiza básicamente en tres secciones, que comprenden la fabricación de la estructura metálica, las piezas de madera que se implementan en este carrete como las duelas y las paredes de la corona circular, y el proceso de ensamble de estas dos partes para obtener finalmente el carrete.

### 7.1 ESTRUCTURA METÁLICA

La estructura metálica esta hecha en el material ASTM A36, en su totalidad; En su proceso de fabricación intervienen las máquinas: la cizalla universal, en la cual se puede realizar corte y troquelado, la cilindradora y un equipo de soldadura SMAW.

**7.1.1 Radio del carrete.** A partir de un perfil en L de 3/16 x 2 ½ in se cortan los 8 radios a una longitud de 45,670in (116cm) cada uno; Este procedimiento se lleva a cabo en una cizalla universal.

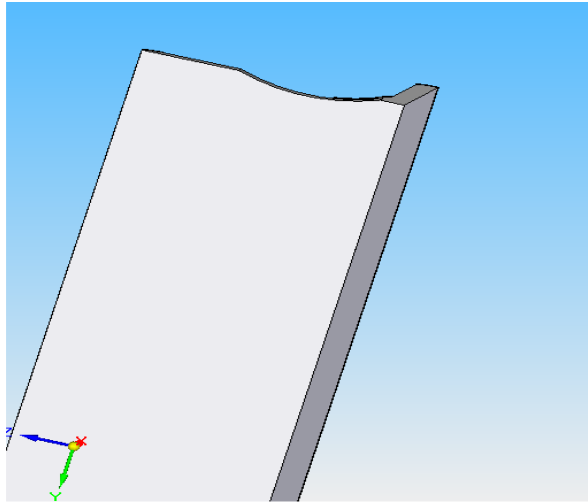
**Figura 7.** Radio del carrete.



Realizado en el Software de diseño en 3D pieza, Solid Edge V.20

**7.1.2 Curvatura del buje.** En un extremo de cada radio se hace la curvatura del buje correspondiente, para poder realizar el ensamble de estos posteriormente en la misma máquina por troquelado.

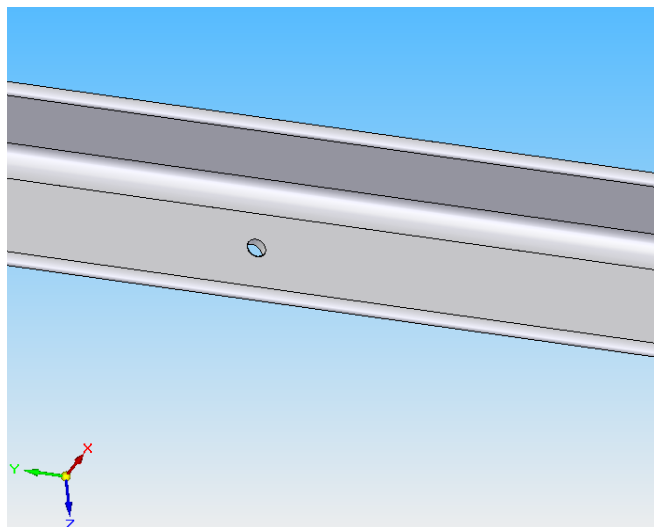
**Figura 8.** Sección circular del radio.



Realizado en el Software de diseño en 3D pieza, Solid Edge V.20

**7.1.3 Agujero para el espárrago.** En cada radio se perforan el agujero para colocar los espárragos a una distancia de 25.830in (65,61cm) del extremo que va al buje, este procedimiento se realiza en la troqueladora de la máquina universal.

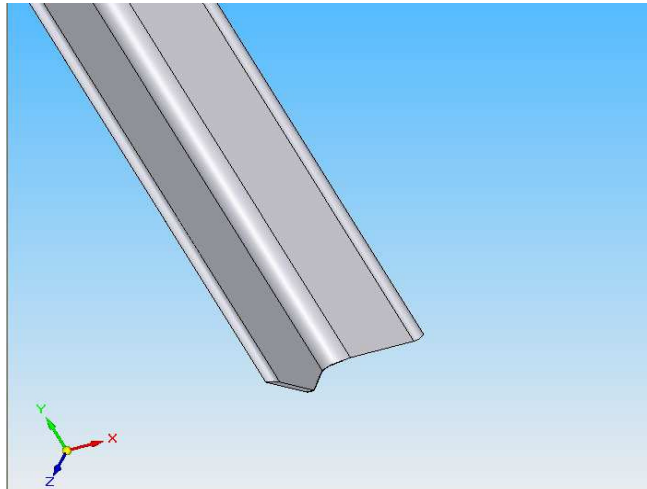
**Figura 9.** Agujero para espárrago.



Realizado en el Software de diseño en 3D pieza, Solid Edge V.20

**7.1.4 Despunte del radio.** En el extremo que va al buje se despunta a un ángulo de  $45^\circ$  de tal forma que no hallan superposiciones de los radios en el momento del ensamble, en la cizalla universal.

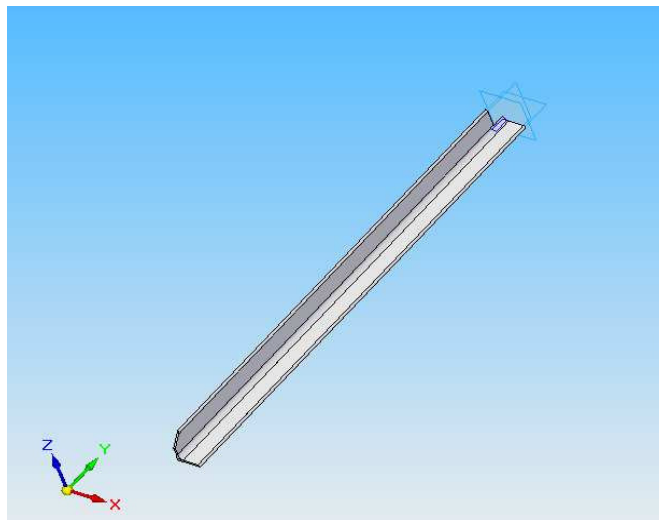
**Figura 10.** Despunte en el radio.



Realizado en el Software de diseño en 3D pieza, Solid Edge V.20

**7.1.5 Corte en L en el radio.** En el extremo que va a la banda de rodamiento se corta una L en la forma del perfil en U de la banda, para que permita el ensamble de entre los radios y este aro exterior.

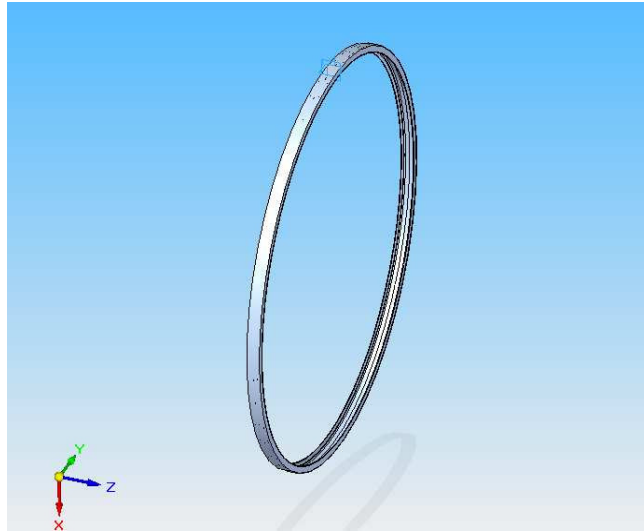
**Figura 11.** Radio del carrete No 24.



Realizado en el Software de diseño en 3D pieza, Solid Edge V.20

**7.1.6 Banda de rodamiento.** El perfil en U de 3 x 3/16in se cilindra a un radio de 47,240in (120cm) para formar la banda de rodamiento, este proceso se hace en una cilindradora.

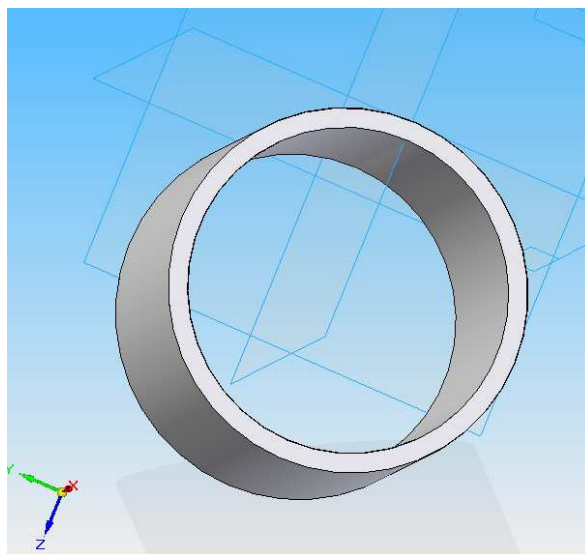
**Figura 12.** Banda de rodamiento.



Realizado en el Software de diseño en 3D pieza, Solid Edge V.20

**7.1.7 Buje del carrete.** Se realiza el buje del carrete a partir de una platina de 1/8 x 1 1/2 in en la cilindradora a un radio de 3.563in (9.05cm) y se realiza la unión por medio de soldadura SMAW con un electrodo 6011 de 1/8in de diámetro, a 175A.

**Figura 13.** Buje del carrete.



Realizado en el Software de diseño en 3D pieza, Solid Edge V.20

## 7.2. PIEZAS EN MADERA

Todas las piezas de madera son fabricadas en sajo; los equipos utilizados en este proceso son: la cepilladora, la cierra radial, la cierra sin fin y la canteadora.

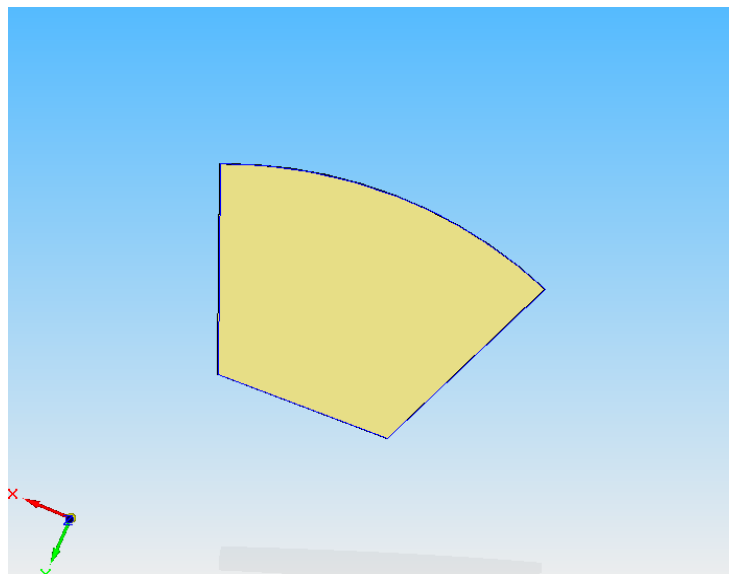
**7.2.1 Materia prima.** La madera para fabricar las paredes de la corona circular se obtiene de placas de 4 x 8in con un espesor inicial de 1,220in (3,10cm), al someterla al proceso de cepillado por ambas caras este espesor se reduce a 1,063in (2,70cm).

**7.2.2 Cascos de cada sección circular.** En la cierra radial se hacen los cascos que conforman cada sección de la corona circular (3 cascos por sección).

**7.2.3 Curvaturas de los cascos.** En la cierra sin fin se hace las curvas de los cascos que llevan la sección circular correspondiente a la banda de rodamiento.

**7.2.4 Rutiado de los cascos.** Los cascos llevan un rutiado para que los radios y las platinas que lo sujetan tengan un mejor ajuste, este rutiado se realiza con la canteadora.

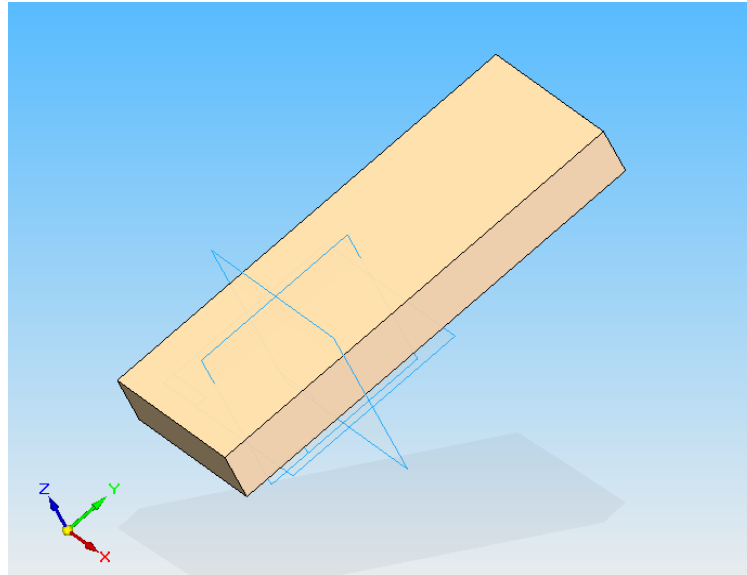
**Figura 14.** Sección de la corona circular.



Realizado en el Software de diseño en 3D pieza, Solid Edge V.20

**7.2.5 Duelas del tambor.** Las duelas de 3,940 x 47,240in (10 x 120cm) se obtienen a partir de placas de 4 x 8in y un espesor de 1,340in (3,40cm), a estas se les realiza un corte en ángulo para lograr la fácil conformación del tambor y que las duelas no tallen y dañen el producto empacado en el carrete.

**Figura 15.** Duelas del tambor del carrete.



Realizado en el Software de diseño en 3D pieza, Solid Edge V.20

**7.2.6 Inmunización de la madera.** Una vez se obtienen las medidas específicas para cada casco se procede a inmunizar el material (madera), esto con el fin de evitar plagas que afecten la calidad del producto; esta inmunización se logra sumergiendo los cascos en agua con inmunizantes de 12 a 24 horas y se deja secar a temperatura ambiente.

### 7.3 ENSAMBLE

Todos los procesos de unión por soldadura, se trabajan con SMAW electrodo 6011 diámetro de 1/8 in a 175A; también se utilizan la prensa y la máquina de armado de los carretes.

**7.3.1 Ensamble de radios y buje.** Los ocho radios se unen al buje por el proceso de soldadura, quedando listo para el ensamble de la banda de rodamiento



**7.3.2 Ensamble de la banda de rodamiento.** La estructura del buje y radios se une a la banda de rodamiento por el proceso de soldadura entre los extremos de los radios y el perfil en U.

**7.3.3 Platinas laterales.** La siguiente unión que se realiza es la de las platinas laterales interiores a los radios, para la sujeción de los cascos de madera en cada sección.

**7.3.4 Aro de la duela.** Se solda el aro de la duela, un perfil en L de 0,118in (0.30cm) de espesor x 1,181in (3cm) en el ala, a los radios, a 27,560in (70cm) desde el centro del buje; Este aro tiene como fin soportar las duelas del tambor del carrete.

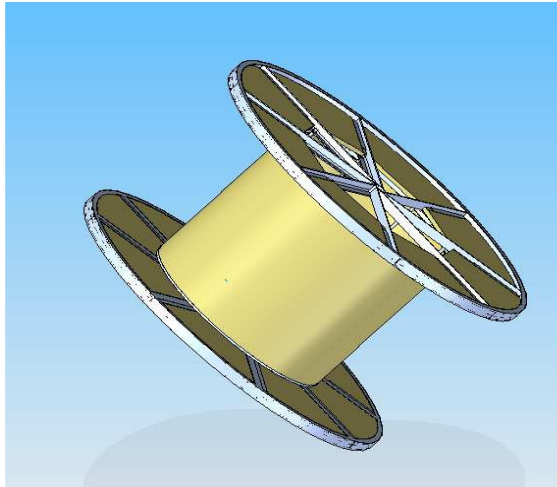
**7.3.5 Platina superior de la duela.** Se solda la platina superior de la duela, la cual permite la correcta ubicación y sujeción de estas en el tambor. Esta platina es de 0,118in x 0,591in (0.30 x 1.50cm) y se ubica de acuerdo al espesor de las duelas.

**7.3.6 Ubicación de la sección circular.** Se ubican los cascos de madera, formando la corona circular que tiene 3 elementos por cada una de sus ocho secciones.

**7.3.7 Sujeción de la corona circular.** Se aplica presión a cada sección de la corona circular y se sujetan con las platinas exteriores soldadas a los radios.

**7.3.8 Tambor.** En la máquina de armado se ubican las dos tapas sujetándolas por el buje, ofreciendo mayor libertad y facilidad de manejo al operario. Se colocan los espárragos de tal forma que permitan orientar las duelas, y una vez este armado el tambor se sujetan los espárragos para asegurar el ensamble.

**Figura 16.** Carrete mixto metal – madera.



Realizado en el Software de diseño en 3D conjunto, Solid Edge V.20

#### **7.4 PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN DEL CARRETE MIXTO METAL – POLI ALUMINIO**

El procedimiento presentado anteriormente para el carrete mixto metal-madera es la base para la fabricación del carrete propuesto de metal – poli aluminio, pues se pretende seguir el mismo patrón adaptándolo para este diseño, a continuación se presenta una propuesta para este proceso de fabricación.

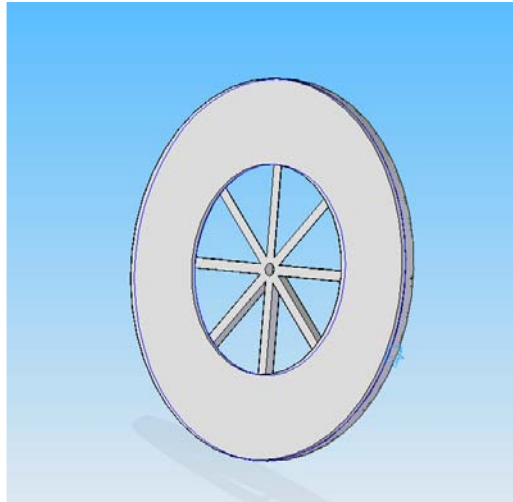
El proceso de fabricación del carrete mixto metal – poli aluminio debe ser muy similar a este con algunas variaciones en su estructura metálica; ya que este carrete no requiere algunos elementos que se incluyen actualmente en los carretes mixtos de metal –madera, además de esto el proceso de ensamble de la estructura metálica y las piezas de poli aluminio sería mas sencillo porque el número de piezas se reduce simplificando este proceso.

**7.4.1 Estructura metálica.** En el proceso de fabricación de la estructura metálica se eliminarían todas las platinas exteriores e interiores que sostienen las secciones de la corona circular, así como el aro de la duela, que permite la sujeción de estas.

**7.4.2 Piezas en poli aluminio.** Las piezas en poli aluminio requeridas serían las duelas del tambor (con igual geometría que las de madera) y la corona circular la cual se fabricaría en 2 secciones únicamente.

**7.4.3 Tapas del carrete.** El proceso de ensamble de las tapas se reduce a la ubicación de las dos secciones de la corona circular sobre la estructura metálica (buje, radios y banda de rodamiento) y su sujeción a esta por medio de tornillos en los radios.

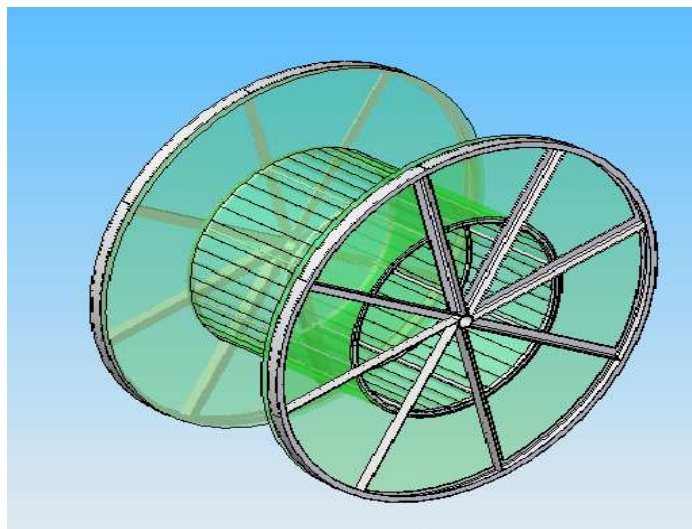
**Figura 17.** Tapas del carrete mixto metal – poli aluminio.



Realizado en el Software de diseño en 3D conjunto, Solid Edge V.20

**7.4.4 Tambor.** El tambor se ubicaría ensamblaría de igual forma que con la madera y se ubicaría entre el poli aluminio y la platina superior de la duela, siguiendo el mismo procedimiento que se implementa actualmente para el carrete metal – madera.

**Figura 18.** Carrete mixto metal- poli aluminio



Realizado en el Software de diseño en 3D conjunto, Solid Edge V.20

## 8. PRUEBAS MECÁNICAS

En el análisis del modelo del carrete No 24 fabricado en poli aluminio y acero estructural ASTM A-36, es indispensable conocer con exactitud las propiedades mecánicas de estos materiales con el fin de obtener resultados confiables que permitan evaluar el comportamiento del carrete estudiado bajo las condiciones reales de trabajo a las que está expuesto y poder determinar con base en su comportamiento mecánico, la respuesta de este objeto de estudio frente a las diferentes actividades a las que estará expuesto, tales como caídas y soporte de la carga de cable establecida para este carrete según su tamaño.

Debido a esto es necesario realizar los ensayos de laboratorio necesarios para caracterizar el material y establecer su comportamiento, de tal forma que se puedan aprovechar al máximo, trabajando dentro de los parámetros de diseño establecidos, las propiedades mecánicas encontradas para lograr la optimización del diseño del carrete mixto metal – poli aluminio No 24.

Los ensayos se realizaron tanto para el acero estructural ASTM A-36, como para el material reciclado de tetra pak, poli aluminio; Se realizaron los ensayos más importantes para obtener la caracterización del material requerida para analizar su comportamiento mecánico de acuerdo a las condiciones de trabajo en el Software Algor.

Al acero estructural ASTM A-36 se le practicaron las siguientes pruebas de laboratorio:

- Análisis químico.
- Ensayo de tracción.
- Prueba de dureza.
- Ensayo de impacto.

Al material reciclado de tetra pak poli aluminio se le practicaron las siguientes pruebas de laboratorio:

- Ensayo de tracción.
- Ensayo de compresión.

## 8.1 PRUEBAS MECÁNICAS DEL ACERO

Para la realización de las pruebas mecánicas del acero se tomo como base el material que se emplea actualmente para la fabricación de los carretes mixtos y completamente metálicos, en condición de suministro, con el fin de determinar con precisión las propiedades mecánicas con las que se está trabajando realmente.

El acero ASTM A-36 (NTC 1920) de la empresa ACASA, empleado actualmente para tal fin, es un acero estructural al carbono, con aplicación en construcción de estructuras metálicas, puentes, torres de energía, torres para comunicación y edificaciones remachadas, atornilladas o soldadas, herrajes eléctricos y señalización.

Según ACASA este acero tiene una composición química estándar como se muestra a continuación en la tabla 7.

**Tabla 7.** Composición química del acero ASTM A-36

<b>Elemento</b>	<b>Cantidad porcentual</b>
Carbono (C)	0,26 max
Manganeso (Mn)	1.2 max
Fósforo (P)	0,04 max
Azufre (S)	0,05 max
Silicio(Si)	0,4 max
Cobre (Cu)	0,2 min

Los valores de las propiedades mecánicas de este acero propuestas por ACASA se presentan en la tabla 8.

**Tabla 8.** Propiedades mecánicas del acero ASTM A-36.

<b>Propiedad mecánica</b>	<b>Valor</b>
Esfuerzo máximo de tensión	400 - 500 Mpa
Esfuerzo de fluencia	250 Mpa min.
Elongación (ductilidad)	21%
Dureza Rockwell B	68 HRB

Al revisar el certificado de calidad de ACASA para cada una de las coladas del acero ASTM A-36, se puede notar que se presentan variaciones en la composición química del material entre una colada y otra, lo cual influye en las propiedades mecánicas del mismo, dependiendo de la alteración de la proporción de cada uno de los elementos presentes.

Este aspecto constituye un factor de error al comparar los datos obtenidos experimentalmente con los datos teóricos, ya que el valor diferencial entre estos no depende únicamente de las condiciones del ensayo, sino que también se debe considerar la alteración de las propiedades mecánicas del material de esa colada debido a los cambios de su composición química.

En la tabla 9 se presenta la composición química del acero ASTM A-36 de 5 coladas diferentes.

**Tabla 9.** Composición química del acero ASTM A-36, para 5 coladas diferentes.

<b>Elemento</b>	<b>% Colada M2212</b>	<b>% Colada 37657</b>	<b>% Colada 37603</b>	<b>% Colada 36961</b>	<b>% Colada S11494</b>	<b>% Colada S11470</b>
Carbono (C)	0,15	0,16	0,18	0,26	0,13	0,13
Manganeso (Mn)	0,54	0,39	0,53	0,57	0,67	0,64
Silicio(Si)	0,18	0,14	0,15	0,24	0,2	0,15
Azufre (S)	0,041	0,028	0,031	0,017	0,029	0,029
Fósforo (P)	0,019	0,012	0,016	0,009	0,015	0,01
Cobre (Cu)	0,25	0,17	0,26	0,18	0,24	0,34

Si se comparan estos valores obtenidos experimentalmente, para cada colada, con los datos teóricos recomendados para el material se pueden apreciar variaciones considerables con errores de hasta un 66% y a partir de un 20%, como se muestra en la tabla 10. Estas diferencias tan grandes tienen grandes influencias en las propiedades mecánicas del material, como se menciono anteriormente, ya que cada elemento afecta de manera directa la calidad y comportamiento del material, como se muestra en la tabla 11.

**Tabla 10.** Análisis de la composición química del acero ASTM A-36, obtenida experimentalmente.

<b>Elemento</b>	<b>Media</b>	<b>% Error</b>
Carbono (C)	0,168	35,256
Manganeso (Mn)	0,557	53,611
Silicio(Si)	0,177	55,833
Asufre (S)	0,029	41,667
Fosforo (P)	0,014	66,250
Cobre (Cu)	0,240	20,000

El cálculo del porcentaje de error se obtuvo implementando la siguiente ecuación:

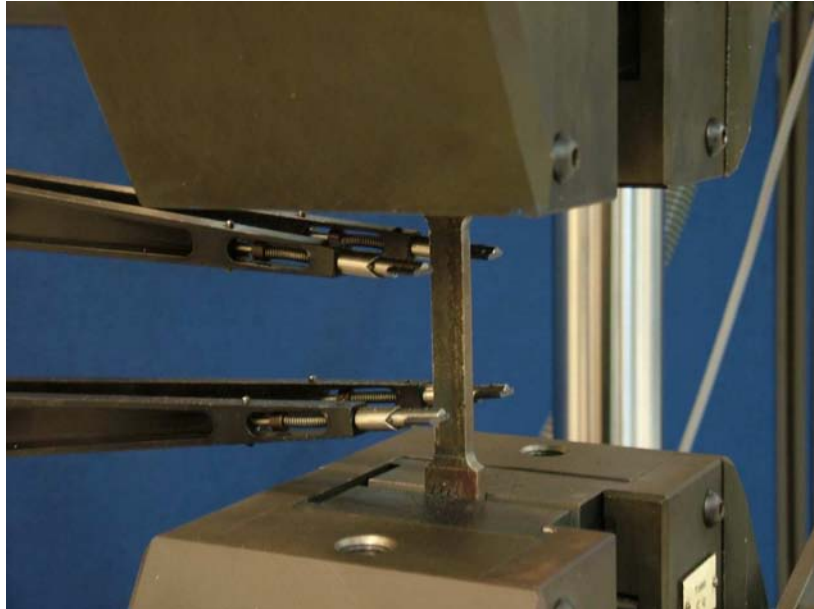
$$\%Error = \frac{Val_{teorico} - Val_{experimental}}{Val_{teorico}} \times 100 \quad \text{Ecuación No 1.}$$

**Tabla11.** Efectos de los elementos químicos en las propiedades del material.

Elemento	Efecto en el material
Manganeso (Mn)	Facilita las operaciones de trabajo en caliente como laminación, moldeo, entre otras, aumenta la penetración del temple y contribuye a la resistencia y dureza.
Silicio (Si)	Se emplea como desoxidante y aumenta la dureza en los aceros de aleación.
Azufre (S)	En grandes cantidades, entre 0.06 y 0.30% aumenta la de los aceros de aleación y al carbono.
Fósforo (P)	Se considera un elemento perjudicial en los aceros, casi una impureza, ya que reduce la ductilidad y la resistencia al impacto.
Cobre (Cu)	Mejora la resistencia a la corrosión

**8.1.1 Ensayo de tracción.** A continuación se presenta la documentación fotográfica de la prueba de tensión.

**Figura 19.** Montaje de la probeta en la Máquina Universal de ensayos UTS 200.3.



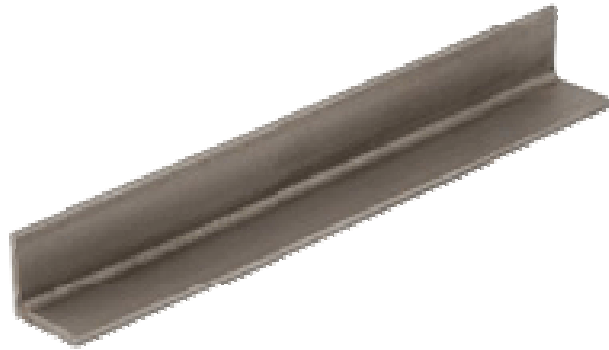
- **Objetivo.** Este ensayo permite determinar las propiedades tensiles del acero estructural ASTM A36, obtenido de la acería ACASA, en probetas de ensayo con forma de mancuerna estándar, en estado de suministro.

- **Método de preparación de las probetas.** Las probetas se prepararon con operaciones de maquinado y corte en una fresadora universal Nantong, con una herramienta de corte tipo fresa de ranurar de corte en zigzag de 25mm de diámetro, a partir de un perfil en L de alas iguales de 2 in y espesor de 0,197 in, según la norma ASTM A6/A6M (NTC 453799).

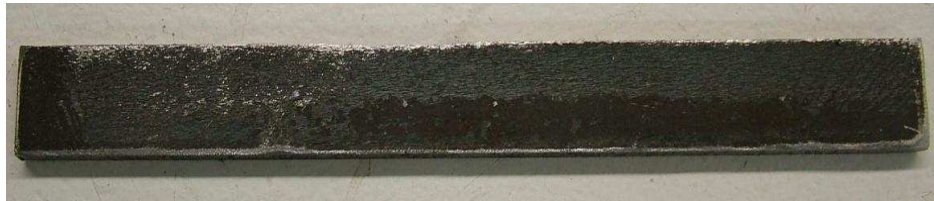
A continuación se presenta una documentación fotográfica de la preparación de las probetas.



**Figura 20.** Perfil en L de alas iguales.



**Figura 21.** Sección rectangular obtenida a partir del perfil.



**Figura 22.** Operación de maquinado en la Fresadora Universal Nantong.



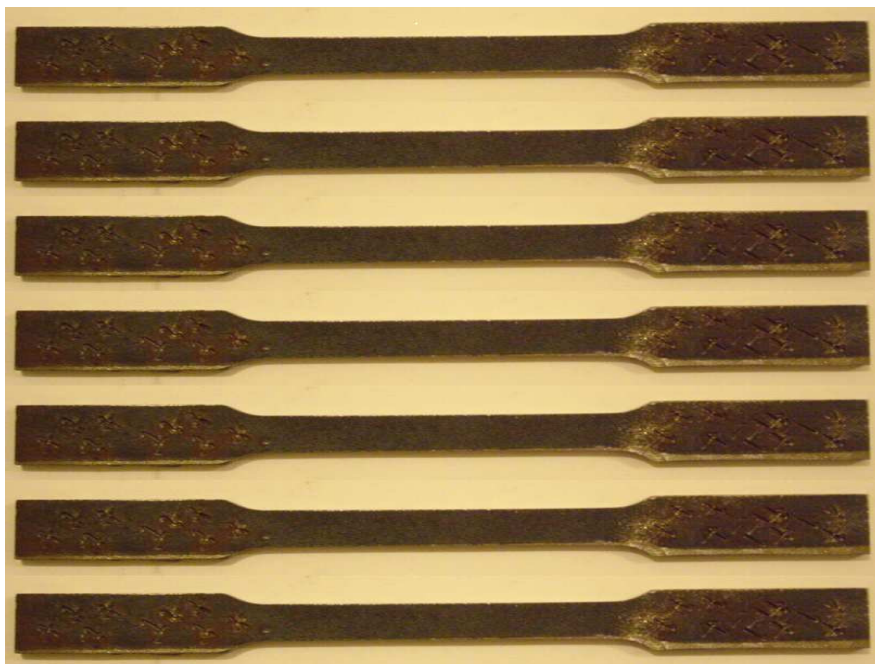
**Figura 23.** Probeta de tensión sin los radios.



**Figura 24.** Probeta de tensión terminada.

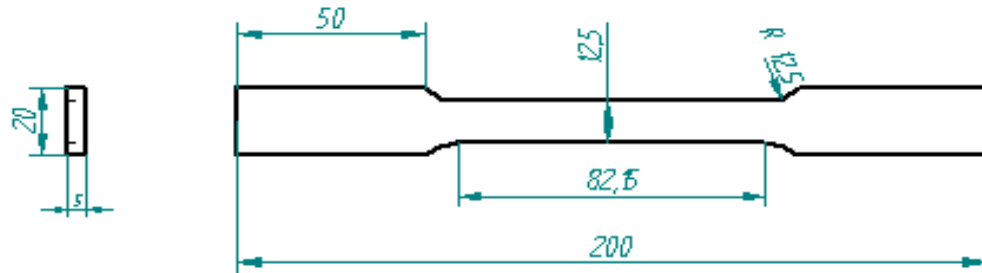


**Figura 25.** Lote de probetas de ensayo.



- **Tipo de probeta y dimensiones.** Se implemento una probeta rectangular para prueba de tensión con las dimensiones presentadas en el plano, en la figura 26.

**Figura 26.** Plano de la probeta para el ensayo de tensión.



Realizado en el Software de diseño en 3D plano, Solid Edge V.20

- **Procedimiento de acondicionamiento.** Las probetas de ensayo se acondicionaron a 23 °C y humedad relativa de 50% durante 72 h antes de realizar el procedimiento
- **Condiciones atmosféricas en el lugar del ensayo.** Los ensayos se realizaron a 23 °C y humedad relativa de 50%
- **Cantidad de probetas ensayadas.** El ensayo se realizo para un lote de 7 probetas.
- **Velocidad de ensayo.** La velocidad de ensayo implementada fue de 11 N/mm<sup>2</sup>s.
- **Clasificación de la máquina.** Máquina universal de ensayos UTS 200.3.

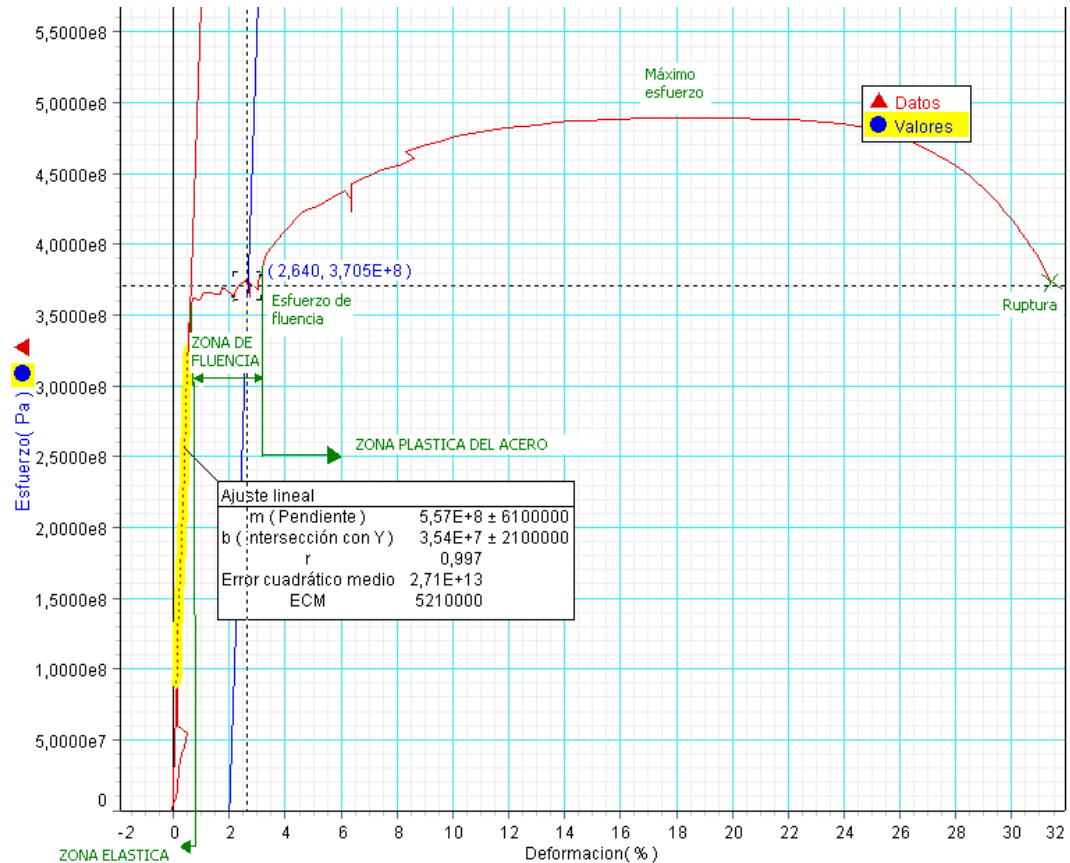
**Figura 27.** Máquina universal de ensayos UTS 200.3.



- **Descripción de la curva Esfuerzo Vs. Deformación.** En la figura de Esfuerzo VS Deformación arrojada por la prueba se pueden apreciar las

diferentes zonas que se presentan normalmente en esta curva y los valores más representativos como se muestra a continuación en la figura 28.

**Figura 28.** Descripción de la curva Esfuerzo vs. Deformación.



➤ **Zona elástica:** En esta zona de la curva al aplicar la fuerza se genera una deformación en la probeta que corresponde al estiramiento de los enlaces entre los átomos, al retirar esta fuerza la probeta recupera su tamaño inicial ya que los enlaces regresan a su longitud inicial, por lo cual esta porción de la curva se caracteriza por presentar una deformación no permanente. En este caso se presenta hasta un valor del 0.95% de la deformación, lo cual equivale a un 0,0096 en la deformación unitaria.

➤ **Zona de fluencia:** Enunciada según la norma como el punto de elongación de fluencia; Hace referencia a la zona del diagrama de esfuerzo-deformación, que separa el fin de la deformación elástica y comienza la deformación plástica, para encontrar este punto se requiere tomar los datos del diagrama y

determinar la diferencia que existe entre el esfuerzo superior de fluencia y el comienzo de la zona plástica del material.

➤ **Zona plástica:** Al incrementar el valor de la fuerza aplicada se presentan dislocaciones, deslizamiento y el material empieza a deformarse plásticamente, pasando de la zona elástica a la plástica, en la cual la deformación ocasionada por el deslizamiento es permanente. En este caso se presenta a partir del 2.6% de la deformación, lo cual equivale a un 0.02568.

➤ **Esfuerzo de fluencia:** Determina el límite entre la zona elástica y la zona plástica. Es a partir de este esfuerzo que el deslizamiento toma valores considerables, por lo cual este esfuerzo es un parámetro fundamental en el diseño de componentes ya que siempre se debe garantizar que durante el uso de estos no ocurra una deformación plástica, lo cual se logra trabajando con valores de esfuerzo por debajo de este valor. En este caso el valor de este esfuerzo es de  $3,7\text{E}+8$  Pa.

➤ **Esfuerzo máximo:** También conocido como la resistencia a la tensión, es el esfuerzo generado por la mayor fuerza aplicada a la probeta, y es el máximo valor que soporta el material antes de la ruptura. En este caso corresponde a un valor de  $4,897\text{E}+8$  Pa.

➤ **Ruptura:** Se presenta cuando la probeta falla completamente, después de alcanzar el esfuerzo máximo.

➤ **Modulo de elasticidad:** Es la pendiente de la curva de esfuerzo Vs. Deformación en la zona elástica que cumple con la ley de Hooke; este modulo esta relacionado con las fuerzas que unen los átomos en el material, cuando se requieren altos valores de fuerza para separar los átomos y producir la deformación elástica, se tiene un modulo de elasticidad o modulo de Young muy alto.

A continuación se presenta el registro fotográfico de los resultados de la prueba de tensión.



**Figura 29.** Cuello de la probeta.



**Figura 30.** Probeta fracturada.



- **Esfuerzo de fluencia obtenido en la prueba.** Este valor se calculo utilizando el método offset al 2% de la deformación, según lo recomienda la norma ASTM E 8/ E8 M-08, implementando el software data Studio para la realización de las figuras necesarias, a partir de los datos arrojados por la máquina de ensayos UTS 200.3 correspondientes a cada prueba.

Para la implementación de este método fue necesario trazar una línea paralela a la figura en la región elástica correspondiente a la ley de Hooke, que corte el

eje x en el 2% de la deformación de la probeta estudiada; De esta forma el valor correspondiente al esfuerzo de fluencia, se encuentra en la intersección de la línea paralela y la figura Esfuerzo Vs. Deformación porcentual, que describe el comportamiento del material, para cada uno de los ensayos realizados.

La ecuación correspondiente a la zona elástica de la figura de Esfuerzo Vs. Deformación porcentual en la que se cumple la ley de Hooke es:

$$y = mx + b \quad \text{Ecuación No 2.}$$

Donde:  $m$  = pendiente.

$b$  = Corte con el eje y.

$x$  = Valores de deformación.

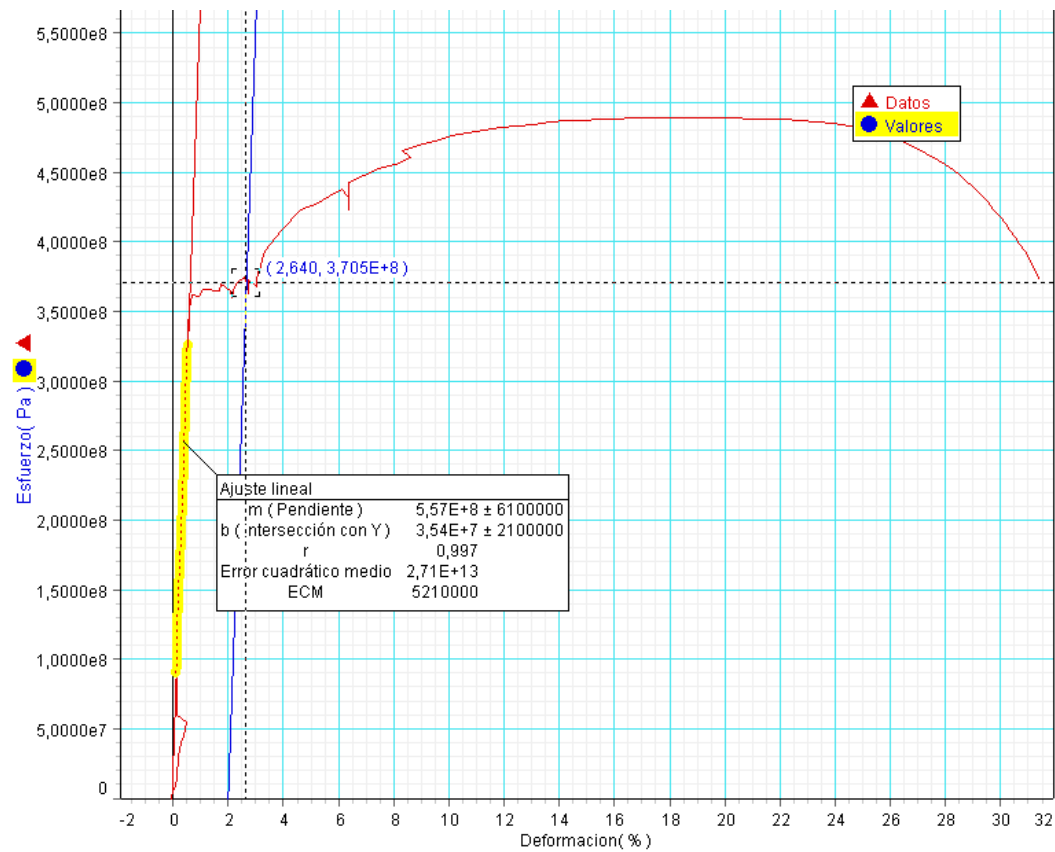
$y$  = Valores de esfuerzo.

De modo que para obtener una línea paralela a esta, basta con conservar la pendiente y cambiar el punto de corte al valor deseado; En este caso, se requería hallar el punto de corte correspondiente a una intersección con el eje x en 2%.

Este valor es posible encontrarlo al reemplazar en la función los valores conocidos de la pendiente (el mismo que el de la figura original), el valor de  $x=2$  y el valor de  $Y=0$ .



**Figura 31.** Figura del Esfuerzo vs. Deformación porcentual de la probeta No. 7



En el cálculo de los datos se estima la desviación estándar entre los resultados de cada prueba, utilizando la siguiente ecuación:

$$s = \sqrt{\frac{(\sum x^2 - n\bar{x}^2)}{(n-1)}} \quad \text{Ecuación No. 3}$$

Donde:  $s$  = Desviación estándar

$x$  = Valor de una sola observación

$n$  = Cantidad de observaciones

$\bar{x}$  = Media aritmética del conjunto de observaciones.

Los resultados obtenidos del ensayo de tracción, que definen el esfuerzo de fluencia del material se presentan en la tabla 12.

**Tabla 12.** Resultados del esfuerzo de fluencia.

Probeta	Sy (Pa) E+8	Deformación (%)
1	3,670	2,151
2	3,619	2,370
3	3,788	2,380
4	3,577	2,700
5	3,723	2,370
6	3,766	2,219
7	3,705	2,640

**Tabla 13.** Análisis estadístico de los resultados del esfuerzo de fluencia.

Esfuerzo de fluencia		Deformación	
Media (Pa)	Desviación estándar	Media (%)	Desviación estándar
3,692E+08	7,622E+06	2,400	0,200

Para verificar los resultados de la prueba se realizó una comparación con los datos teóricos para este material; los cuales son sugeridos por ACASA.

Se recomienda que el valor del esfuerzo de fluencia mínimo debe ser de 2,5E+8 Pa; y en este caso el valor promedio nos da de 3,692E+8Pa, lo cual se encuentra dentro del rango adecuado según el fabricante; sin embargo este valor es mucho mayor que el dato teórico, lo cual permite que el material sea más resistente, ya que su Sy es mayor, y por ende su zona de trabajo también.

- **Esfuerzo máximo obtenido por la prueba.** La resistencia a la tracción o también conocida como esfuerzo ultimo se encuentra dividiendo la máxima fuerza que soporto la probeta por el área de sección transversal original de esta.

$$\sigma_u = F_{\max} / A \text{ Ecuación No 4.}$$

Donde:  $\sigma_u$ =Esfuerzo máximo.

$F_{\max}$ =Fuerza máxima soportada por la probeta

$A$ = Área de la sección transversal, 60mm<sup>2</sup>.

Los resultados obtenidos para el valor del esfuerzo máximo del material se presentan a continuación en la tabla 14.

**Tabla 14.** Resultados del esfuerzo máximo.

<b>Probeta</b>	<b>Fuerza máxima (N)</b>	<b>Esfuerzo máximo (Pa)</b>	<b>Deformación unitaria (adim)</b>
1	28590,240	4,765E+08	0,170
2	29088,440	4,848E+08	0,170
3	29683,890	4,947E+08	0,170
4	29124,870	4,854E+08	0,180
5	29602,850	4,934E+08	0,160
6	29438,870	4,906E+08	0,170
7	29412,500	4,902E+08	0,170

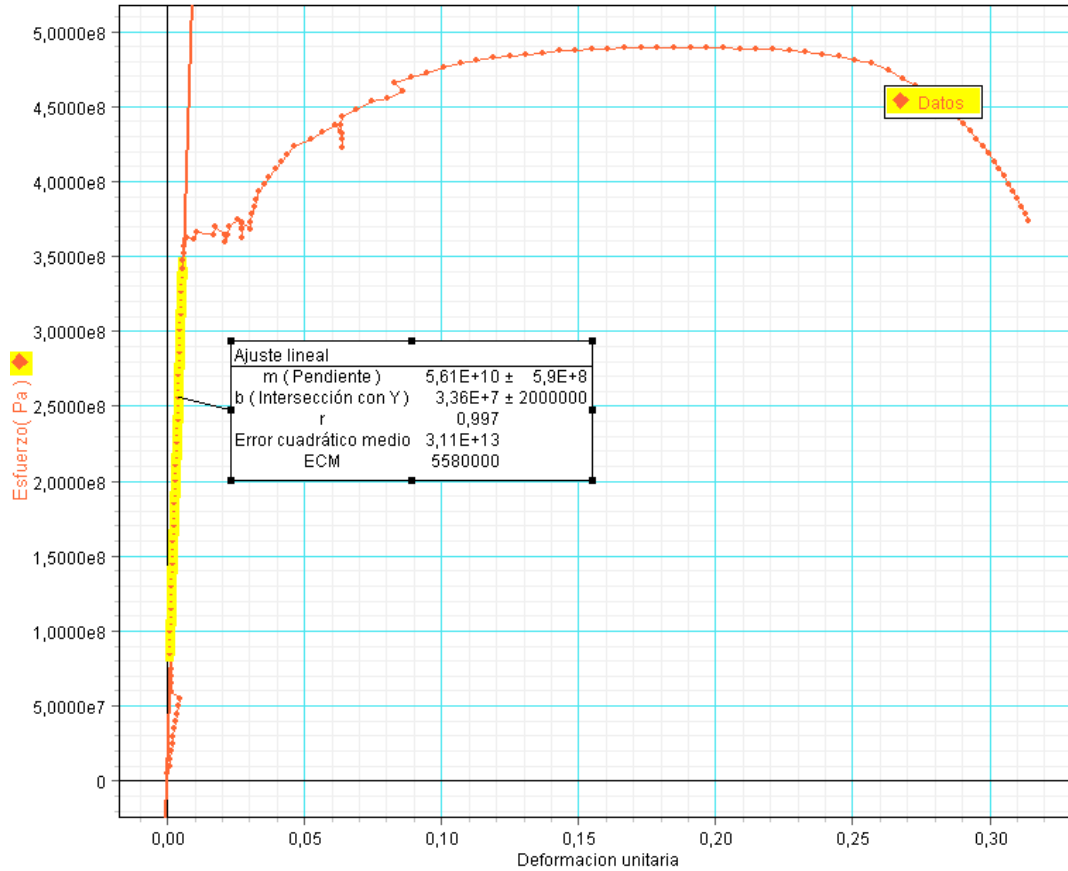
**Tabla 15.** Análisis estadístico de los resultados del esfuerzo máximo.

<b>Esfuerzo máximo</b>		<b>Deformación unitaria</b>	
Media (Pa)	Desviación estandar	Media (adim)	Desviación estandar
4,880E+08	6,26E+06	0,170	0,006

Comparando estos valores de esfuerzo máximo con los datos teóricos se puede determinar que se encuentran dentro del rango adecuado para este material, el cual esta entre 400 y 550 MPa, y en este caso se tiene un valor promedio de 488 MPa.

- **Modulo de elasticidad obtenido de la prueba.**

**Figura 32.** Esfuerzo Vs. Deformación unitaria.



De la figura 32 se puede obtener un dato muy importante en los aceros, el modulo de elasticidad,  $E$ , el cual corresponde al valor de la pendiente de la recta de la zona elástica que cumple con la ley de Hooke, en la cual la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria es proporcional. En este caso el modulo de elasticidad presenta un valor de  $5,61E+10$  Pa.

Los valores arrojados por la prueba para este parámetro se presentan a continuación en la tabla 16.

**Tabla 16.** Resultados del modulo de elasticidad.

Probeta	Modulo de elasticidad (Pa)
1	2,12E+11
2	2,53E+11
3	2,11E+11
4	2,17E+11
5	2,53E+11
6	2,04E+11
7	1,80E+11

**Tabla 17.** Análisis estadístico de los resultados del modulo de elasticidad.

Modulo de elasticidad		
Media (Pa)	Desviación estándar	% Error
2,19E+11	2,64E+10	6,10263523

Al comparar estos valores del modulo de elasticidad con los valores teóricos recomendados para los aceros, se puede determinar que son valores muy cercanos, ya que el teórico es de 206 MPa, y el experimental es de 219 MPa presentando un error del 6%, el cual se puede considerar aceptable para este tipo de pruebas mecánicas si se consideran posibles fallas de error debidas al maquinado y defectos del material analizado.

- **Elongación y área transversal reducida obtenida en la prueba.** Cuando la elongación de la probeta es mayor al 3%, se debe juntar cuidadosamente los finales de la probeta fracturada y medir la distancia que existe entre marcas del extensómetro; para conocer el área reducida se emplea el mismo método que se emplea para el cálculo de la elongación, se juntan los extremos fracturados de la probeta y se mide el grosor en la mínima sección; la diferencia entre al área encontrada y el área de sección transversal original es la reducción del área.

**Elongación.** En la figura 33 se puede observar una probeta antes de la prueba y una probeta elongada por consecuencia de fuerzas suministradas en la prueba de tracción, a simple vista se puede ver que este material tiene muy buena ductilidad por su gran estiramiento.

**Figura 33.** Elongación de la probeta.



Los resultados obtenidos para el valor de la elongación del material se presentan a continuación en la tabla 18.

**Tabla 18.** Resultados de la elongación.

Probeta	Elongación (mm)
1	15,532
2	14,916
3	15,300
4	14,906
5	14,634
6	14,985
7	15,704

**Tabla 19.** Análisis estadístico de los resultados de la elongación.

Elongación (mm)		
Media (mm)	Desviación estándar	% de elongación
15,14	0,383482228	30,279

La teoría de los aceros dice que estos tienen elongación de hasta un 20 %, por lo tanto podemos observar que el material estudiado tiene una gran ductilidad ya que su elongación alcanzo más de un 30% en el área de estudio de la probeta.

**Reducción de área transversal.** El acero estructural ASTM A36 estudiado, a mostrado en la prueba de tracción ser un material muy dúctil, igualmente si

observamos el área de sección reducida, podemos comprobar esta hipótesis. En la figura 34 se puede observar el cuello formado en la prueba de tracción en una de las probetas estudiadas.

**Figura 34.** Cuello de la probeta.



**8.1.2 Ensayo de dureza.** Se realizó un ensayo de dureza según la norma NTC 3996 para determinar la dureza Rockwell B que corresponde a este acero ASTM A-36, mediante el siguiente procedimiento:

Se preparó la probeta a través de las operaciones de corte y maquinado en la fresadora universal Nantong, posteriormente se lijo y pulió hasta obtener un acabado espejo y se realizaron 10 mediciones de dureza Rockwell B y Vickers utilizando el micro durometro.

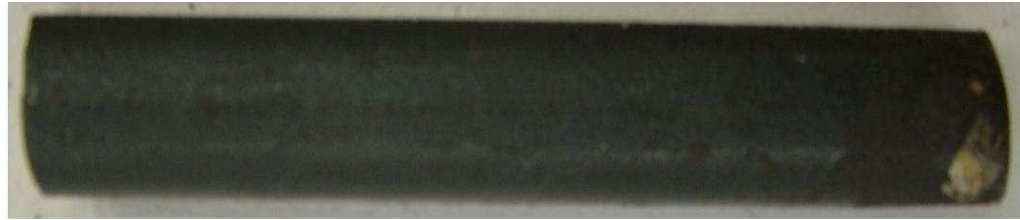
En las pruebas de micro dureza se aplica una fuerza reducida, con un penetrador de diamante, de tal forma que se obtenga la dureza en función de la profundidad a través de una sección de la muestra.

- **Objetivo.** Este ensayo permite determinar la dureza del acero estructural ASTM A-36, obtenido de la acería de caldas ACASA, en una probeta de ensayo plana, en estado de suministro.

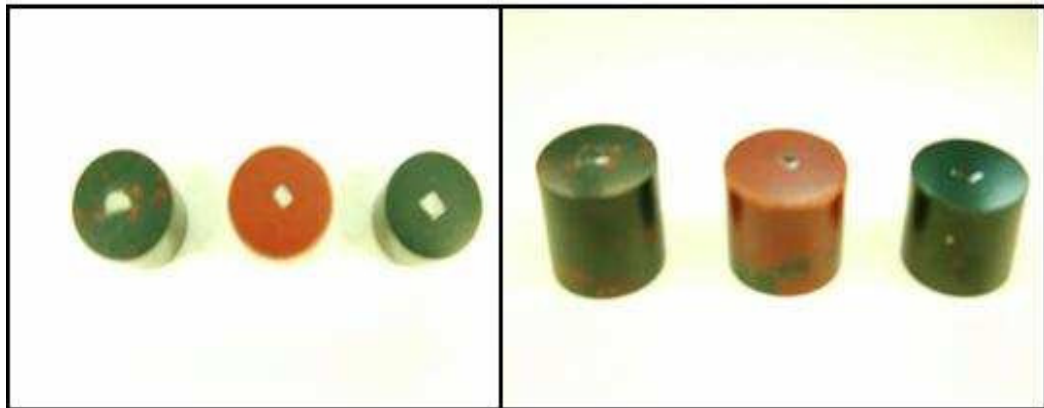
- **Método de preparación de las probetas.** Las probetas se prepararon con operaciones de maquinado y corte en una fresadora universal Nantong, con una herramienta de corte tipo fresa de cuatro filos, 12 mm, de acero rápido, a partir de un perfil circular de 15 mm de diámetro.

A continuación se presenta la documentación fotográfica de la preparación de la probeta para el ensayo de dureza.

**Figura 35.** Sección circular.

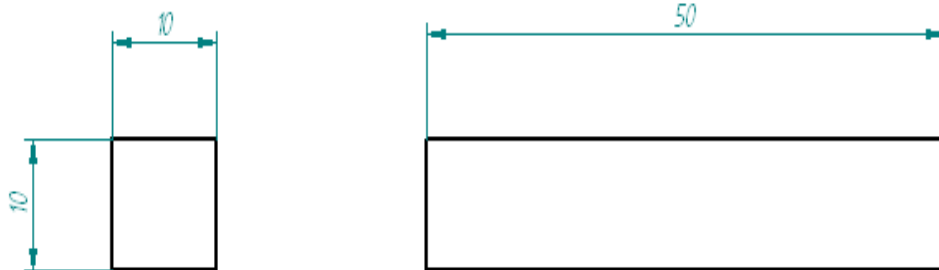


**Figura 36.** Probeta de ensayo obtenida a partir de la sección circular.



- **Tipo de probeta y dimensiones.** Se implemento una probeta plana para prueba de micro dureza con las dimensiones presentadas en el plano, en la figura 37.

**Figura 37.** Plano de la probeta para la prueba de micro dureza.



Realizado en el Software de diseño en 3D plano, Solid Edge V.20



- **Procedimiento de acondicionamiento.** Las probetas de ensayo se acondicionaron a 23 °C y humedad relativa de 50% durante 72 h antes de realizar el procedimiento
- **Condiciones atmosféricas en el lugar del ensayo.** Los ensayos se realizaron a 23 °C y humedad relativa de 50%
- **Cantidad de muestras realizadas.** Se realizaron 10 mediciones de dureza Rockwell B y Vickers.
- **Carga aplicada.** Se aplico una carga de 300gr durante 30 segundos.
- **Clasificación de la máquina.** Micro durómetro Vickers Indentec modelo ZHV1.

**Figura 38** Micro durómetro Vickers Indentec modelo ZHV1.



- **Resultados de dureza Rockwell B y Vickers.** Los resultados de dureza Rockwell B y Vickers obtenidos en la prueba se presentan a continuación en la tabla 20.

**Tabla 20.** Resultados de dureza Rockwell B y Vickers en el acero ASTM A-36.

Medición	Dureza Rockwell B (HRB)	Dureza Vickers (HV)
1	98	240
2	96,4	229
3	No registra valor	248
4	No registra valor	275
5	No registra valor	261
6	95,7	225
7	99,5	217
8	95,6	224
9	No registra valor	245
10	99,8	219

Aplicando la ecuación 3 enunciada en el ítem 5.1.1.10 se realiza el cálculo de la desviación estándar correspondiente a este valor y se presenta en la tabla 21.

**Tabla 21.** Análisis estadístico de los resultados de dureza.

Dureza Rockwell B		Dureza Vickers	
Media (HRB)	Desviación estándar	Media (HV)	Desviación estándar
97,500	1,876	238,300	19,143

Al comparar el valor de dureza obtenidos experimentalmente con el valor teórico para este material, se puede determinar que se encuentra dentro de un rango aceptable ya que la dureza Rockwell B debe ser de 68 HRB y se obtuvo un valor promedio de 97.5 HRB.

Si se realiza un cálculo del error porcentual aplicando la ecuación 1 enunciada en el ítem 5.1 y se obtiene un valor de 43%, lo cual se puede considerar recordando que la composición química del material tiene grandes variaciones con relación a los parámetros teóricos establecidos para este material.

**8.1.3 Ensayo de impacto.** Se realizó el ensayo de impacto en la máquina de ensayos Charpy según la norma ASTM E23-07 mediante el siguiente procedimiento:

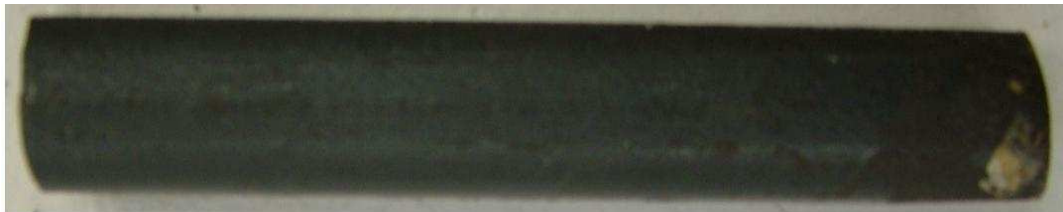
La probeta de análisis térmicamente acondicionada, se coloca en el apoyo de la máquina de impacto Charpy contra los apoyos; el péndulo es puesto en libertad sin vibraciones, y la muestra es impactada por este. La información se obtiene de la máquina y las partes fracturadas de la probeta.

- **Objetivo.** Este ensayo permite determinar la resistencia a la ruptura del acero estructural ASTM A36, obtenido de la acería ACASA, en probetas de ensayo estándar con muesca en V, en estado de suministro.

- **Método de preparación de las probetas.** Las probetas se prepararon con operaciones de maquinado y corte en una fresadora universal Nantong, con una herramienta de corte tipo fresa de cuatro filos, 12 mm, de acero rápido, a partir de un perfil circular de 15 mm de diámetro.

A continuación se presenta la documentación fotográfica de la preparación de las probetas.

**Figura 39.** Sección circular.



**Figura 40.** Proceso de maquinado en la Fresa universal Nantong.



**Figura 41.** Sección rectangular obtenida de la sección circular.

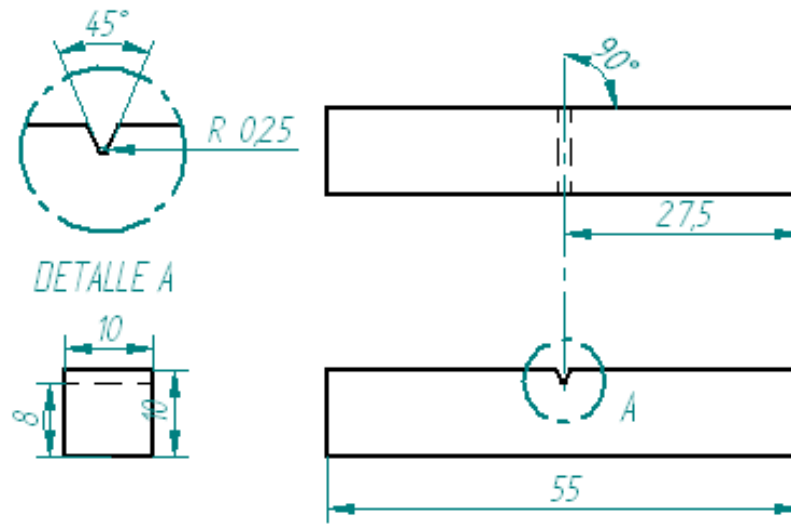


**Figura 42.** Probeta de ensayo con muesca en V para prueba de impacto Charpy.



- **Tipo de probeta y dimensiones.** Se implemento una probeta rectangular con muesca en V para prueba de impacto Charpy con las dimensiones presentadas en el plano, en la figura 44.

**Figura 43.** Plano de la probeta para la prueba de impacto.



Realizado en el Software de diseño en 3D plano, Solid Edge V.20

- **Procedimiento de acondicionamiento.** Las probetas de ensayo se acondicionaron a 23 °C y humedad relativa de 50% durante 72 h antes de realizar el procedimiento
- **Condiciones atmosféricas en el lugar del ensayo.** Los ensayos se realizaron a 23 °C y humedad relativa de 50%
- **Cantidad de probetas ensayadas.** El ensayo se realizó para un lote de 9 probetas.
- **Capacidad del péndulo.** El péndulo tiene una capacidad máxima de 294 j y 300°
- **Clasificación de la máquina.** Máquina para ensayo de impacto tipo Charpy.

**Figura 44.** Máquina par aprueba de impacto Charpy.



- **Tipo de falla.** De las nueve probetas seis presentaron fractura completa y tres no se fracturaron.
- **Resultados de la resistencia al impacto.** Al realizar la prueba la lectura de la máquina para cada ensayo arrojó los datos de la resistencia al impacto presentados en la tabla 22.

**Tabla 22.** Resultados de la resistencia al impacto.

Probeta	Resistencia al impacto (j)	Angulo de barrido (°)	Estado final
1	215,820	210	Probeta no fracturada
2	210,915	212	Probeta no fracturada
3	199,143	220	Probeta si fracturada
4	196,200	218	Probeta no fracturada
5	196,200	218	Probeta si fracturada
6	197,181	217	Probeta si fracturada
7	197,181	217	Probeta si fracturada
8	194,238	219,8	Probeta si fracturada
9	216,801	220	Probeta si fracturada

Aplicando la ecuación 3 enunciada en el ítem 5.1.1.10 se realiza el cálculo de la desviación estándar correspondiente a estos valores y se presenta en la tabla 23.

**Tabla 23.** Análisis estadístico de los resultados de la prueba de impacto.

Resistencia al impacto		Angulo de barrido	
Media (j)	Desviación estándar	Media (°)	Desviación estándar
202,631	9,138	216,867	3,565

El valor obtenido en esta prueba para la resistencia al impacto del acero estructural ASTM A-36, es un valor que presenta una variación estándar muy pequeña por lo cual es posible afirmar que se obtuvo gran precisión en esta medición y que el ensayo de impacto arrojó valores adecuados para la muestra analizada haciendo mínimos los factores causantes de error.

En la práctica se pudo comprobar por el sonido de impacto y la zona de fractura en la probeta que se trata de un material dúctil, ya que se pueden apreciar una deformación muy marcada en la zona de falla lo que representa una característica típica de la fractura dúctil y contraría a una fractura frágil.

A continuación se presenta un registro fotográfico de los resultados del ensayo de impacto.



**Figura 45.** Probeta fracturada.



**Figura 46.** Probeta no fracturada.





## 8.2 PRUEBAS MECÁNICAS DEL POLI ALUMINIO

Las pruebas mecánicas de este material se realizaron a partir del material reciclado de tetrapack, poli aluminio, el cual se obtuvo por medio de una máquina de laboratorio para compactar plásticos por adhesión mecánica, controlando las variables de presión y temperatura.

**8.2.1 Método de ensayo para determinar las propiedades de tensión en los plásticos.** Este ensayo se realizó según la norma NTC 595:2007 cuarta actualización, correspondiente a la norma ASTM D638:2003, bajo el siguiente procedimiento.

- ◆ Se rectificó las medidas de la probeta de ensayo.
- ◆ Se ubicó la probeta en las mordazas de la máquina de ensayo, alineando el eje longitudinal de la probeta y las mordazas; se ajustó las mordazas uniforme y firmemente hasta el grado necesario para evitar el deslizamiento de la probeta durante el ensayo, pero no hasta el punto de triturarlo.
- ◆ Se fijó el indicador de extensión.
- ◆ Se ajustó la velocidad de ensayo.
- ◆ Se registró la curva de carga de carga – extensión de la probeta.
- ◆ **Objetivo.** Este método comprende la determinación de las propiedades ténsiles de plásticos en probetas de ensayo con forma de mancuerna estándar cuando se ensayan en condiciones definidas de pretratamiento, temperatura, humedad y velocidad de la máquina de ensayo.

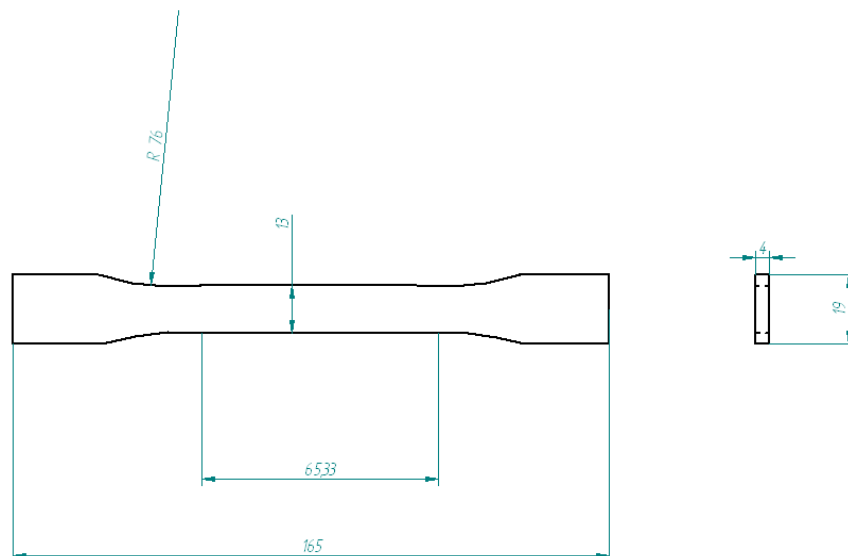
**Método de preparación de las probetas.** Las probetas se prepararon con la operación de troquelado, a partir de poli aluminio en lámina.

**Figura 47.** Lamina de poli aluminio.



- **Tipo de probeta y dimensiones.** Para materiales con espesor de 7mm o menos se debe usar la probeta tipo I, con las dimensiones presentadas en el plano en la figura 48.

**Figura 48.** Plano de la probeta para la prueba de tracción de plásticos tipo I. Dimensiones en mm.



Realizado en el Software de diseño en 3D plano, Solid Edge V.20

- **Acondicionamiento de las probetas.** Las probetas se acondicionaron a 23 °C y humedad relativa de 50% 72 horas antes del ensayo.
- **Condiciones atmosféricas en el lugar del ensayo.** Los ensayos se realizaron a 23 °C y humedad relativa de 50%.
- **Cantidad de probetas ensayadas.** El ensayo se realizó para un lote de 6 probetas.
- **Velocidad del ensayo.** Cuando la velocidad del material no se ha especificado, como en este caso, según la norma se debe utilizar la velocidad mínima recomendada para la geometría de la probeta empleada, la cual produce ruptura en un periodo entre ½ minuto y 5 minutos de ensayo. En este caso la velocidad mínima correspondiente a la probeta tipo I es de 5 mm/min.
- **Especificación de la máquina de ensayo.** El ensayo se realizó en la máquina de ensayos Instron 3366 la cual cumple con las siguientes condiciones:
  - ♠ Elemento fijo que porte la mordaza.
  - ♠ Elemento móvil que tenga una segunda mordaza.
  - ♠ Mordazas para sujetar el espécimen de ensayo entre los elementos fijo y móvil de la máquina de ensayo, pueden ser fijas o de tipo de auto alineación.
  - ♠ Máquina de tipo de velocidad constante del movimiento de la cruceta.

**Figura 49.** Máquina de ensayos Instron 3366.



- **Resultados de esfuerzo obtenidos en la prueba.** Los resultados de resistencia de tracción a ruptura obtenidos en la prueba se presentan a continuación en la tabla 24.

Para obtener los resultados se realizó la corrección del cero deformación para la curva Esfuerzo Vs. Deformación, según lo recomienda la norma NTC 595:2007.

El esfuerzo de resistencia de tracción a ruptura se obtuvo dividiendo la carga máxima por el área promedio de la sección transversal original del segmento de referencia de la probeta. En este caso el valor de la carga máxima corresponde al valor de la carga causante de la ruptura en la probeta, lo cual es la razón del nombre del esfuerzo enunciado, ya que el esfuerzo máximo en este caso es el mismo esfuerzo de ruptura; De igual forma es importante destacar que según la caracterización de la norma para el esfuerzo de fluencia, el representa el punto de la curva en el cual la pendiente es cero, en este caso no existe para este material, por lo cual no este valor no se registra.

**Tabla 24.** Resultados de esfuerzo obtenidos de la prueba de tensión en el poli aluminio fabricado en laboratorios de la Autónoma.

Probeta	Esfuerzo en el punto de rotura (MPa)	Deformación unitaria (mm/mm)
1	5,172	0,031
2	7,127	0,038
3	5,843	0,025
4	6,262	0,026
5	7,013	0,035
6	7,167	0,037

Aplicando la ecuación 3 enunciada en el ítem 5.1.1.10 se realiza el cálculo de la desviación estándar correspondiente a estos valores y se presenta en la tabla 25.

**Tabla 25.** Análisis estadístico de los resultados de esfuerzo del ensayo de tensión en el poli aluminio fabricado en laboratorios de la Autónoma.

Esfuerzo en el punto de rotura		Deformación unitaria	
Media (Mpa)	Desviación estándar	Media (mm/mm)	Desviación estándar
6,431	0,815	0,032	0,006

**Figura 50.** Probeta de tracción de poli aluminio después del ensayo.



Es necesario hacer una comparación de estos datos obtenidos experimentalmente con los datos obtenidos de un material fabricado en producción, los cuales se presentan a continuación en la tabla 26.

**Tabla 26.** Resultados de esfuerzos del ensayo de tracción de un material fabricado en producción industrial.

Probeta	Tensión en el punto de rotura (MPa)	Deformación en el punto de rotura (mm/mm)
1	5,519	0,032
2	5,783	0,031
3	4,817	0,022
4	6,033	0,034
5	5,369	0,031

**Tabla 27.** Análisis estadístico de los resultados de esfuerzo obtenidos del material fabricado en producción industrial.

Esfuerzo		Deformación	
Media (Mpa)	Desviación estándar	Media (mm/mm)	Desviación estándar
5,504	0,460	0,030	0,005

Al comparar los datos obtenidos con el material fabricado en los laboratorios de la Universidad Autónoma de Occidente con los valores obtenidos del material fabricado en producción, se tiene una diferencia del 22% y del 14%, para la tensión en el punto de rotura y para la deformación respectivamente, en la cual influye principalmente el ruido del material, ya que al obtenerse del reciclaje tiene mucha contaminación de materiales diferentes a los analizados en este caso.

Para determinar un valor próximo al esfuerzo de cedencia se realizó la corrección al 0.1% según la norma NTC 595:2007 aplicada para desarrollar esta prueba. El valor de la resistencia a la cedencia a 0,1% de compensación se trazo una línea paralela a la zona lineal de la curva esfuerzo Vs. Deformación, que cortara el eje x en 0.1%. Para ello se implemento la ecuación 1, enunciada en el ítem 5.1.1.10. Los resultados se presentan en la tabla 28.

**Tabla 28.** Resultados de la resistencia a la cedencia a 0,1% de compensación del poli aluminio fabricado en laboratorios de la Autónoma.

<b>Probeta</b>	<b>Resistencia a la cedencia a 0,1% de compensación (Mpa)</b>	<b>% de deformación</b>
1	3.390	0.780
2	2.750	0.650
3	2.90	0.650
4	2.890	0.640
5	2.880	0.640

**Tabla 29.** Análisis estadístico de los resultados de la resistencia a la cedencia a 0,1% de compensación del poli aluminio fabricado en laboratorios de la Autónoma.

<b>Resistencia a la cedencia a 0,1% de compensación</b>		<b>Deformación</b>	
Media (Mpa)	Desviación estándar	Media (%)	Desviación estándar
2.962	0.247	0.672	0.061

**Tabla 30.** Resultados de la resistencia a la cedencia a 0,1% de compensación del poli aluminio fabricado en producción industrial.

Probeta	Resistencia a la cedencia a 0,1% de compensación (Mpa)	% de deformación
1	3.390	0.780
2	2.750	0.650
3	2.900	0.650
4	2.890	0.640
5	2.880	0.640

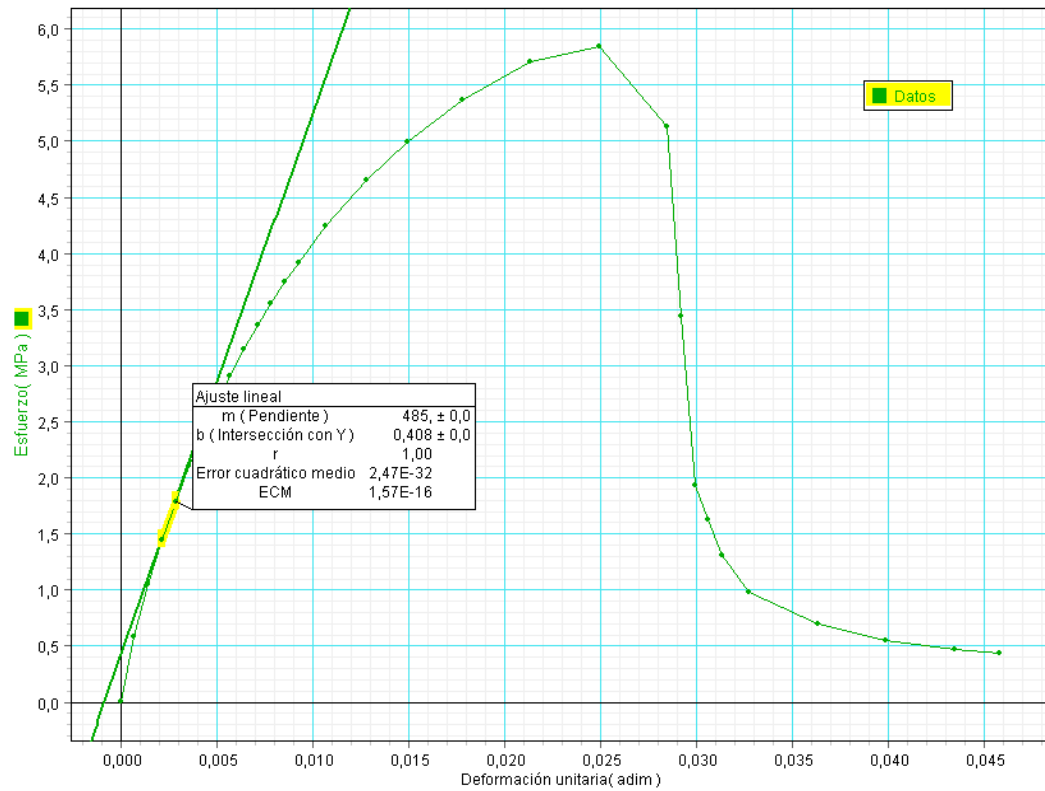
**Tabla 31.** Análisis estadístico de los resultados de la resistencia a la cedencia a 0,1% de compensación del poli aluminio fabricado en producción industrial.

Resistencia a la cedencia a 0,1% de compensación		Deformación	
Media (Mpa)	Desviación estándar	Media (%)	Desviación estándar
2.962	0.247	0.672	0.061

Al comparar los valores de la resistencia a la cedencia a 0.1% de compensación obtenidos para el poli aluminio fabricado en los laboratorios de la universidad Autónoma de Occidente y el fabricado en producción industrial se tiene una diferencia del 19.372%.

- **Modulo de elasticidad.** Este valor corresponde a la pendiente de la curva de Esfuerzo Vs. Deformación unitaria en la zona lineal; en este caso se obtuvo por medio del software DataStudio, en el cual se graficaron los datos correspondientes y se realizo el ajuste lineal a la grafica en esta región, como se presenta en la figura 51.

**Figura 51.** Grafica de Esfuerzo Vs. Deformación unitaria.



Los valores de módulo de elasticidad obtenidos en la prueba se presentan a continuación en la tabla 32.

**Tabla 32.** Resultados del modulo de elasticidad obtenidos en la prueba de tensión del poli aluminio fabricado en laboratorios de la Autónoma.

Probeta	Módulo de elasticidad (Mpa)
1	558
2	599
3	546
4	536
5	515
6	485

Aplicando la ecuación 3 enunciada en el ítem 5.1.1.10 se realiza el cálculo de la desviación estándar correspondiente a estos valores y se presenta en la tabla 33.



**Tabla 33.** Análisis estadístico de los resultados del módulo de elasticidad del ensayo de tensión en el poli aluminio fabricado en la Autónoma.

<b>Módulo de elasticidad</b>	
Media (MPa)	Desviación estándar
539,833	38,747

**Tabla 34.** Resultados del modulo de elasticidad obtenidos en la prueba de tensión del poli aluminio fabricado en producción industrial.

<b>Probeta</b>	<b>Módulo de elasticidad (Mpa)</b>
1	559
2	467
3	516
4	506
5	522

**Tabla 35.** Análisis estadístico de los resultados del módulo de elasticidad del ensayo de tensión en el poli aluminio fabricado en producción industrial.

<b>Modulo de elasticidad</b>	
Media (Mpa)	Desviación estándar
514	33,038

Al comparar los datos obtenidos a partir del material fabricado en laboratorios de la Universidad Autónoma de Occidente con los datos obtenidos a partir del material fabricado en producción industrial, se presenta una diferencia del 4.78%, el cual es un valor aceptable para esta medición.

- **Elongación.** El cambio en la longitud de referencia con relación a la longitud de referencia original de la probeta, obtenida en los ensayos se presenta a continuación en la tabla 36.

**Tabla 36.** Porcentaje de elongación obtenido en el ensayo de tracción del poli aluminio fabricado en laboratorios de la Autónoma.

<b>probeta</b>	<b>% de elongación</b>
1	3,24
2	4,17
3	4,69
4	4,17
5	4,17
6	4,58

Aplicando la ecuación 3 enunciada en el ítem 5.1.1.10 se realiza el cálculo de la desviación estándar correspondiente a estos valores y se presenta en la tabla 37.

**Tabla 37.** Análisis estadístico de los resultados del % de elongación del ensayo de tensión en el poli aluminio fabricado en laboratorios de la Autónoma.

<b>% de elongación</b>	
<b>Media (%)</b>	<b>Desviación estándar</b>
4,170	0,511

**Tabla 38.** Análisis estadístico de los resultados del % de elongación del ensayo de tensión en el poli aluminio fabricado en producción industrial.

<b>Probeta</b>	<b>% Elongación</b>
1	4,350
2	3,600
3	3,790
4	3,830
5	3,190

**Tabla 39.** Análisis estadístico de los resultados del % de elongación del ensayo de tensión en el poli aluminio fabricado en producción industrial.

<b>% Elongación</b>	
<b>Media (%)</b>	<b>Desviación estándar</b>
3,752	0,419

Al comparar los datos de % de elongación obtenidos a partir del material fabricado en laboratorios de la Universidad Autónoma de Occidente con los

obtenidos a partir del material fabricado en producción industrial, se tiene una diferencia del 10% aproximadamente.

**8.2.2 Método de ensayo para determinar las propiedades de compresión en los plásticos.** Este ensayo se realizó según la norma ASTM D695:2008, bajo el siguiente procedimiento:

- ♠ Se rectificaron las medidas de la probeta de ensayo.
- ♠ Se ubicó la probeta de análisis entre las superficies de la herramienta de compresión alineándola con el eje central del embolo y garantizando que los extremos de la probeta son paralelos con la superficie de la herramienta. Se ajustó la cruceta hasta que entraron en contacto la parte superior de la herramienta de compresión con la probeta.
- ♠ Se ajustó la velocidad adecuada.
- ♠ Se registraron los datos de la curva carga – deformación.
- ♦ **Objetivo.** Este método comprende la determinación de las propiedades mecánicas de compresión en los plásticos rígidos reforzados y no reforzados incluyendo compuestos de altos módulos.

**Método de preparación de las probetas.** Las probetas se prepararon con la operación de troquelado, a partir de poli aluminio en lámina.

- **Tipo de probeta y dimensiones.** Las probetas se pueden preparar por operaciones de mecanizado a partir de laminas, placas, varas, tubos u objetos similares, también se pueden preparar por compresión de moldeo o por inyección. Los tamaños de la probeta en forma de prisma son de 12,7 por 12,7 por 25,4 mm.
- **Acondicionamiento de las probetas.** Las probetas se acondicionaron a 23 °C y humedad relativa de 50% 72 horas antes del ensayo.
- **Condiciones atmosféricas en el lugar del ensayo.** Los ensayos se realizaron a 23 °C y humedad relativa de 50%.

- **Cantidad de probetas ensayadas.** El ensayo se realizo para un lote de 5 probetas.
- **Velocidad del ensayo.** La velocidad estándar de las pruebas es de 1,3 +/- 0,3 mm/min.
- **Especificación de la máquina de ensayo.** El ensayo se realizo en la máquina de ensayos Instron 3366 la cual cumple con las siguientes condiciones:
  - ◆ Cuenta con las mordazas adecuadas para sujetar la probeta de ensayo entre los elementos fijo y móvil de la máquina de ensayo, y que permiten realizar un control de la velocidad del cabezal móvil respecto del cabezal fijo.
  - ◆ Cuenta con un indicador de carga capaz de registrar la máxima carga que genere la compresión total de la probeta.
  - ◆ Cuenta con una herramienta de compresión para la aplicación de la carga a la probeta de análisis.
- **Resultados de esfuerzo obtenidos en la prueba.** Los resultados de resistencia de compresión a ruptura obtenidos en la prueba se presentan a continuación en la tabla 40.

El esfuerzo de resistencia de compresión a ruptura se obtuvo dividiendo la carga máxima por el área promedio de la sección transversal original de la probeta. En este caso el valor de la carga máxima corresponde al valor de la carga causante de la ruptura en la probeta, lo cual es la razón del nombre del esfuerzo enunciado, ya que el esfuerzo máximo en este caso es el mismo esfuerzo de ruptura.

**Tabla 40.** Resultados de esfuerzo obtenidos de la prueba de compresión en el poli aluminio fabricado en laboratorios de la Autónoma.

Probeta	Resistencia máxima a la ruptura por compresión (MPa)	Desplazamiento en la ruptura (mm)
1	16,769	4,424
2	19,033	4,797
3	16,792	4,728
4	17,407	4,342
5	17,662	4,697

Aplicando la ecuación 3 enunciada en el ítem 5.1.1.10 se realiza el cálculo de la desviación estándar correspondiente a estos valores y se presenta en la tabla 41.

**Tabla 41.** Análisis estadístico de los resultados de esfuerzo del ensayo de compresión en el poli aluminio fabricado en laboratorios de la Autónoma.

Resistencia a la ruptura		Desplazamiento en la ruptura	
Media (MPa)	Desviación estándar	Media (mm)	Desviación estándar
17,533	0,924	4,598	0,201

**Figura 52.** Probeta de compresión después del ensayo.



**Tabla 42.** Resultados de esfuerzo obtenidos de la prueba de compresión en el poli aluminio fabricado en producción industrial.

Probeta	Resistencia máxima a la ruptura por compresión (Mpa)	Desplazamiento en la ruptura (mm)
1	26,647	8,485
2	21,725	7,570
3	19,536	7,076
4	19,921	7,237
5	16,000	5,785
6	22,727	8,242
7	17,416	6,656

**Tabla 43.** Análisis estadístico de los resultados de esfuerzo del ensayo de compresión en el poli aluminio fabricado en producción industrial.

Resistencia máxima por compresión		Desplazamiento máximo	
Media (Mpa)	Desviación estándar	Media (mm)	Desviación estándar
20,567	3,541	7,293	0,925

Al comparar estos datos obtenidos a partir de materiales de diferente fabricación, se tiene una diferencia del 14.7%, en la cual influye principalmente el ruido del material, ya que al obtenerse del reciclaje tiene mucha contaminación de materiales diferentes a los analizados en este caso; además de ello se desconocen las condiciones de fabricación del material con que se esta comparando estos valores lo cual puede inducir grandes variaciones en las mediciones de las propiedades mecánicas.

- **Modulo de elasticidad.** Este valor corresponde a la pendiente de la curva de Esfuerzo Vs. Deformación unitaria en la zona lineal; y se encuentra al dividir la diferencia de esfuerzos correspondientes a este segmento de la curva entre la diferencia correspondiente a la deformación para el mismo segmento.

Los valores de módulo de elasticidad obtenidos en la prueba se presentan a continuación en la tabla 44.

**Tabla 44.** Resultados del modulo de elasticidad a compresión para el poli aluminio fabricado en laboratorios de la Autónoma.

Probeta	Modulo de elasticidad a compresión (Mpa)
1	123,716
2	111,883
3	121,774
4	142,871
5	120,675

Aplicando la ecuación 3 enunciada en el ítem 5.1.1.10 se realiza el cálculo de la desviación estándar correspondiente a estos valores y se presenta en la tabla 45.

**Tabla 45.** Análisis estadístico de los resultados del módulo de elasticidad a compresión del poli aluminio fabricado en laboratorios de la Autónoma.

Modulo de elasticidad a compresión	
Media (MPa)	Desviación estándar
104,184	52,390

**Tabla 46.** Resultados del modulo de elasticidad a compresión para el poli aluminio fabricado en producción industrial.

Probeta	Modulo de elasticidad a compresión (Mpa)
1	59,914
2	63,066
3	57,534
4	57,481
5	58,057
6	55,238
7	57,017

**Tabla 47.** Análisis estadístico de los resultados del módulo de elasticidad a compresión del poli aluminio fabricado en producción industrial.

Modulo de elasticidad	
Media (Mpa)	Desviación estándar
58,330	2,505

Al comparar estos datos obtenidos experimentalmente a partir de materiales de diferente fabricación, se presenta una diferencia del 44%. Esta diferencia puede presentarse debido a factores de ruido del poli aluminio fabricado por la Autónoma y a la variación de los parámetros de fabricación del material entre el fabricado en producción industrial y la Autónoma.

Un valor mayor en el modulo de elasticidad indica que el material requiere de una aplicación de carga mayor para deformarse en la compresión.

- **Compresión.** El cambio en la longitud de referencia con relación a la longitud de referencia original de la probeta, obtenida en los ensayos de compresión se presenta a continuación en la tabla 48.

**Tabla 48.** Porcentaje de compresión del poli aluminio fabricado en laboratorios de la Autónoma.

Probeta	Porcentaje de compresión
1	19,235
2	20,857
3	20,557
4	18,878
5	20,422

Aplicando la ecuación 3 enunciada en el ítem 5.1.1.10 se realiza el cálculo de la desviación estándar correspondiente a estos valores y se presenta en la tabla 49.

**Tabla 49.** Análisis estadístico de los resultados del % de compresión del poli aluminio fabricado en laboratorios de la Autónoma.

Porcentaje de compresión	
Media (%)	Desviación estándar
19,990	0,875



**Tabla 50.** Porcentaje de compresión del poli aluminio fabricado en producción industrial.

Probeta	Porcentaje de compresión
1	32,635
2	30,040
3	27,215
4	31,329
5	24,617
6	35,373
7	28,567

**Tabla 51.** Análisis estadístico de los resultados del % de compresión del poli aluminio fabricado en producción industrial.

Porcentaje de compresión	
Media (%)	Desviación estándar
29,968	3,567

Al comparar estos datos de % de compresión obtenidos experimentalmente a partir de materiales fabricados de formas diferentes, se tiene una diferencia del 33.3% aproximadamente.

### 8.3 PRUEBAS MECÁNICAS DE LA MADERA

Es necesario realizar las pruebas mecánicas a la madera con la que actualmente se fabrican los carretes mixtos No 24 para poder realizar una comparación entre las propiedades mecánicas del material actual, madera - Sajo, y el material por el cual se desea reemplazar, poli aluminio.

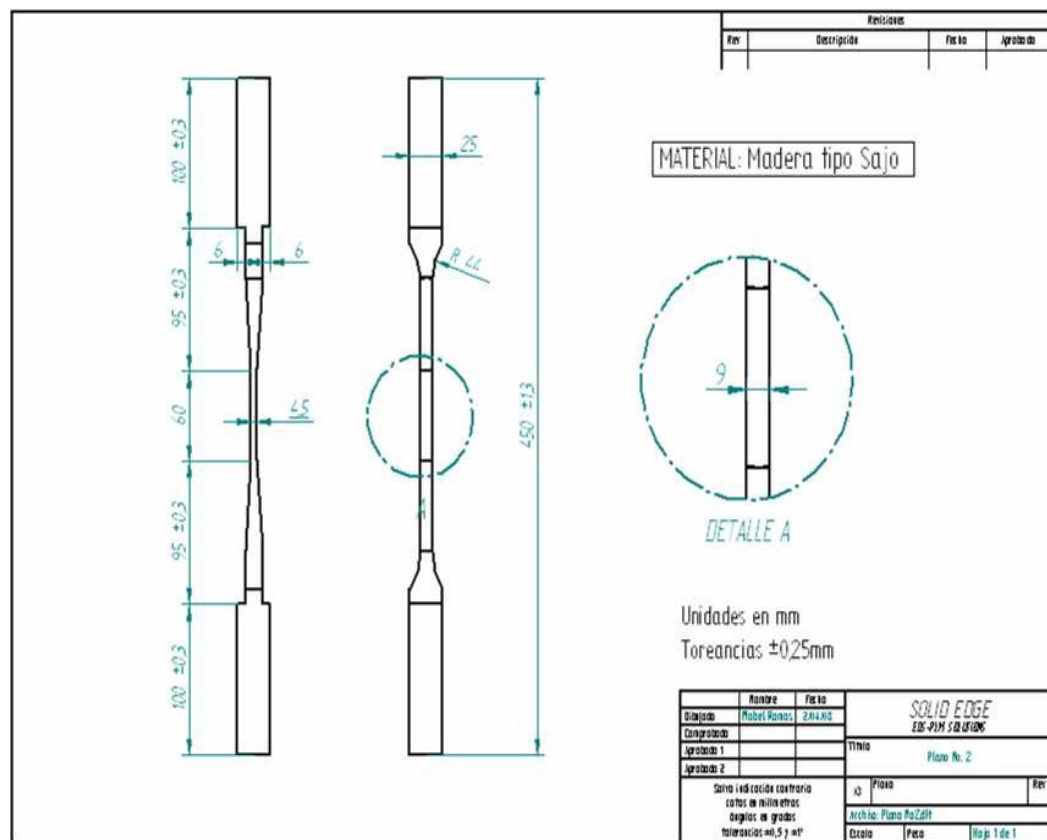
**8.3.1 Ensayo de Tracción.** Teniendo en cuenta que la madera es un material anisotrópico, es necesario realizar dos pruebas de tracción: una paralela al grano (en la dirección de las fibras) y otra de forma perpendicular al grano, porque esto influye en las propiedades de la madera por el efecto que ejercen los granos sobre las cargas.

- **Ensayo de tracción paralela al grano.** El método se basa en aplicar una carga continua de tracción de dirección paralela al grano de la madera hasta llegar al punto de falla de la probeta y se realizó siguiendo la norma NTC 944.

Debido a la geometría de la probeta fue necesario implementar el tipo de mordazas indicada en la norma NTC 944, con la geometría y dimensiones mostradas en el anexo B.

El ensayo se realizo en la máquina universal de ensayos UTS 200.3 a una velocidad de  $1.00 \pm 0.25 \text{ mm/min}$ , con las probetas correspondientes a esta prueba, presentadas a continuación.

**Figura 53.** Plano de la probeta de madera para ensayo de tracción paralela al grano.



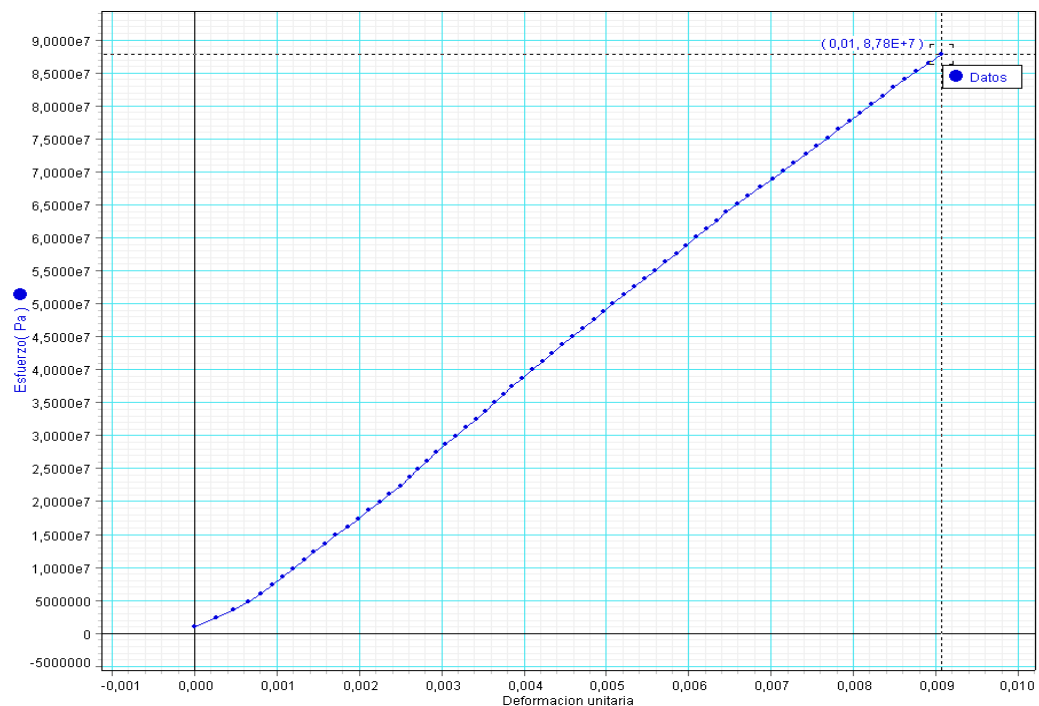
Realizado en el Software de diseño en 3D plano, Solid Edge V.20

**Figura 54.** Probetas para el ensayo de tracción paralela al grano.



- **Esfuerzo de fluencia obtenido en la prueba.** Debido al comportamiento frágil del material, este no presenta zona plástica, como se muestra en la figura 55, por lo tanto se hará el registro de la tensión en el punto de ruptura ya que no se puede referenciar el punto de fluencia.

**Figura 55.** Esfuerzo vs. Deformación sin zona plástica. Ensayo de tracción paralela al grano.



- **Esfuerzo último.** La tensión en el punto de ruptura o también conocida como esfuerzo último se encontró dividiendo el esfuerzo máximo entre el área de la sección transversal de la probeta.

Los resultados obtenidos para el valor de tensión en el punto de ruptura del material se presentan a continuación en la tabla 52, que al realizarles un análisis estadístico se determina en esfuerzo último promedio.

**Tabla 52.** Resultados del esfuerzo último para el ensayo de tracción paralela al grano.

Probeta	Fuerza máxima (N)	Esfuerzo último (MPa)
1	4819.5	119
2	3555.9	87,8
3	5062.5	125
4	4293.0	106
5	5143.5	127

**Tabla 53.** Análisis estadístico de los resultados del esfuerzo último para el ensayo de tracción paralela al grano.

Esfuerzo ultimo	
Media (Mpa)	Desviación estándar
113	16,3

- **Modulo de elasticidad obtenido de la prueba.** Utilizando el software DataStudio para calcular este parámetro en este material, el cual corresponde a la pendiente de la grafica esfuerzo vs. deformación unitaria, se obtuvieron los valores presentados a continuación en la tabla 54.

**Tabla 54.** Resultados del modulo de elasticidad. Ensayo de tracción paralela al grano.

Probeta	Modulo de elasticidad (GPa)
1	13
2	10,1
3	13
4	12,5
5	12,6

**Tabla 55.** Análisis estadístico de los resultados del modulo de elasticidad. Ensayo de tracción paralela al grano.

Módulo de elasticidad	
Media (Gpa)	Desviación estándar
12,2	1,2

▪ **Deformación en la prueba.** El calculo de la elongación se realizo a partir de la relación que existe entre la longitud inicial de referencia y la longitud final de referencia (Deformación %). En la tabla 56 se muestra los valores de deformación porcentual de los ensayos realizados en esta prueba.

**Tabla 56.** Resultados de la deformación porcentual. Ensayo de tracción paralela al grano.

Probeta	Deformación (%)
1	1,091
2	0,907
3	1,236
4	1,024
5	1,242

**Tabla 57.** Análisis estadístico de los resultados de la deformación porcentual. Ensayo de tracción paralela al grano.

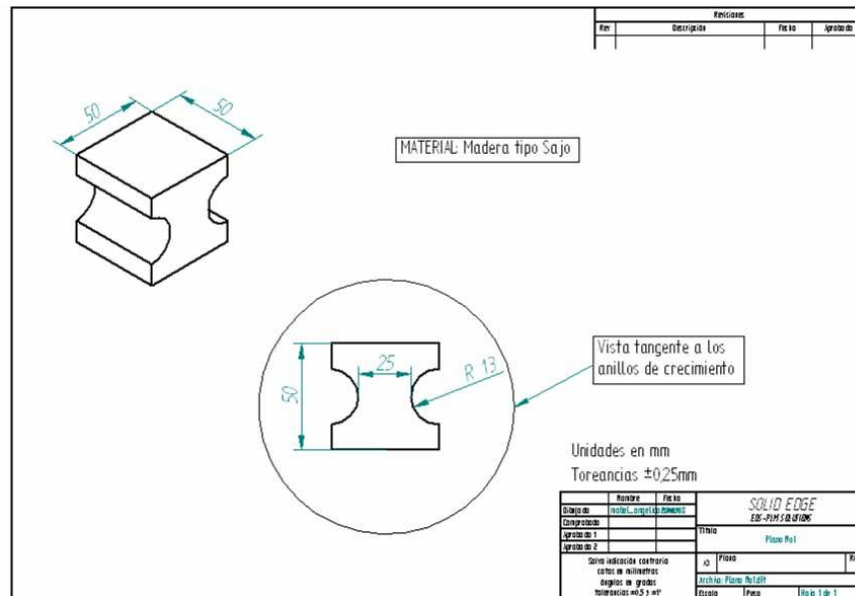
% de Deformación	
Media (%)	Desviación estándar
1,1	0,1

- **Ensayo de tracción perpendiculares al grano.** El método se basa en aplicar una carga continua de tracción en dirección perpendicular al grano de la madera hasta llegar al punto de falla de la probeta y se realizo siguiendo la norma NTC 961.

Debido a la geometría de la probeta fue necesario implementar el tipo de mordazas indicada en la norma NTC 961, con la geometría y dimensiones mostradas en el anexo C.

El ensayo se realizo en la máquina universal de ensayos UTS 200.3 a una velocidad de 2.5mm/min, con las probetas correspondientes a esta prueba, presentadas a continuación.

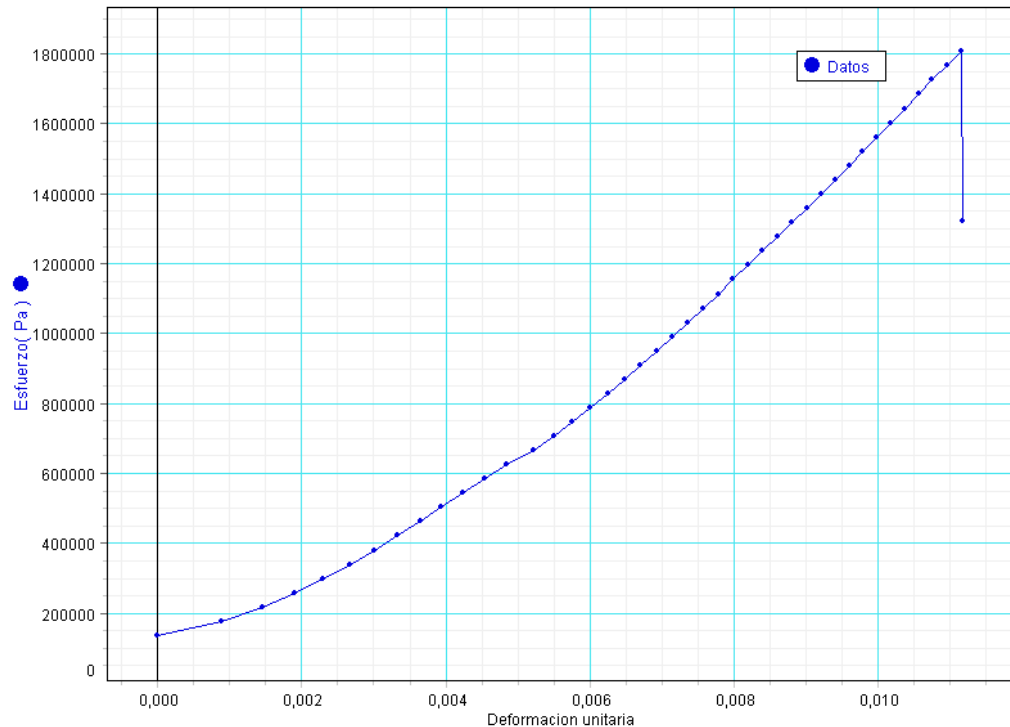
**Figura 56.** Plano de probeta de madera para ensayo de tracción perpendicular al grano.



Realizado en el Software de diseño en 3D plano, Solid Edge V.20

- **Esfuerzo de fluencia obtenido en la prueba.** Debido al comportamiento frágil del material, en el sentido perpendicular al grano de la madera tampoco presenta fluencia, como se muestra en la figura 57, por lo tanto se hará el registro de la tensión en el punto de ruptura.

**Figura 57.** Esfuerzo vs. Deformación sin zona plástica. Ensayo de tracción perpendicular al grano.



- **Tensión en el punto de ruptura.** La tensión en el punto de ruptura o también conocida como esfuerzo último se encontró dividiendo la fuerza máxima entre el área de la sección transversal de la probeta, los resultados se presentan en la tabla 58.

**Tabla 58.** Resultados del esfuerzo último para el ensayo de tracción perpendicular al grano.

Probeta	Fuerza máxima (N)	Esfuerzo último (MPa)
1	2149,4	1,72
2	2389,6	1,91
3	2259,3	1,81
4	2051,7	1,64
5	1583,5	1,27

**Tabla 59.** Análisis estadístico de los resultados del esfuerzo último para el ensayo de tracción perpendicular al grano.

Esfuerzo ultimo	
Media (Mpa)	Desviación estándar
1,67	0,25

▪ **Modulo de elasticidad obtenido de la prueba.** Utilizando el software DataStudio para calcular este parámetro en este material, el cual corresponde a la pendiente de la grafica esfuerzo vs. deformación unitaria, se obtuvieron los valores presentados a continuación en la tabla 60.

**Tabla 60.** Resultados del modulo de elasticidad. Ensayo de tracción perpendicular al grano.

Probeta	Modulo de elasticidad (GPa)
1	0,23
2	0,31
3	0,21
4	0,22
5	0,22



**Tabla 61.** Análisis estadístico de los resultados del modulo de elasticidad. Ensayo de tracción perpendicular al grano.

<b>Módulo de elasticidad</b>	
Media (Gpa)	Desviación estándar
0,24	0,04

- **Deformación en la prueba.** El calculo de la elongación se realizo a partir de la relación que existe entre la distancia entre las mordazas al iniciar la prueba y al finalizarla (Deformación %), cuyos datos se encuentran en la tabla 62 de cada una de las probetas ensayadas.

**Tabla 62.** Resultados de la deformación porcentual. Ensayo de tracción perpendicular al grano.

<b>Probeta</b>	<b>Deformación (%)</b>
1	0,797
2	0,86
3	1,117
4	0,967
5	0,78

**Tabla 63.** Análisis estadístico de los resultados de la deformación porcentual. Ensayo de tracción perpendicular al grano.

<b>% de Deformación</b>	
Media (%)	Desviación estándar
0,9	0,1

**8.3.2 Ensayo de compresión.** Al igual que en el ensayo de tracción, cuando se habla de compresión en la madera hay que tener en cuenta que este material es anisotrópico por lo tanto se debe probar en la dirección de sus fibras y perpendicular a ellas, debido a que la carga máxima aplicada podría variar dependiendo de la posición de los granos de la madera. Pero particularmente se va a realizar solo el ensayo de compresión paralela al grano, esto es porque usualmente en la industria de fabricación de carretes de

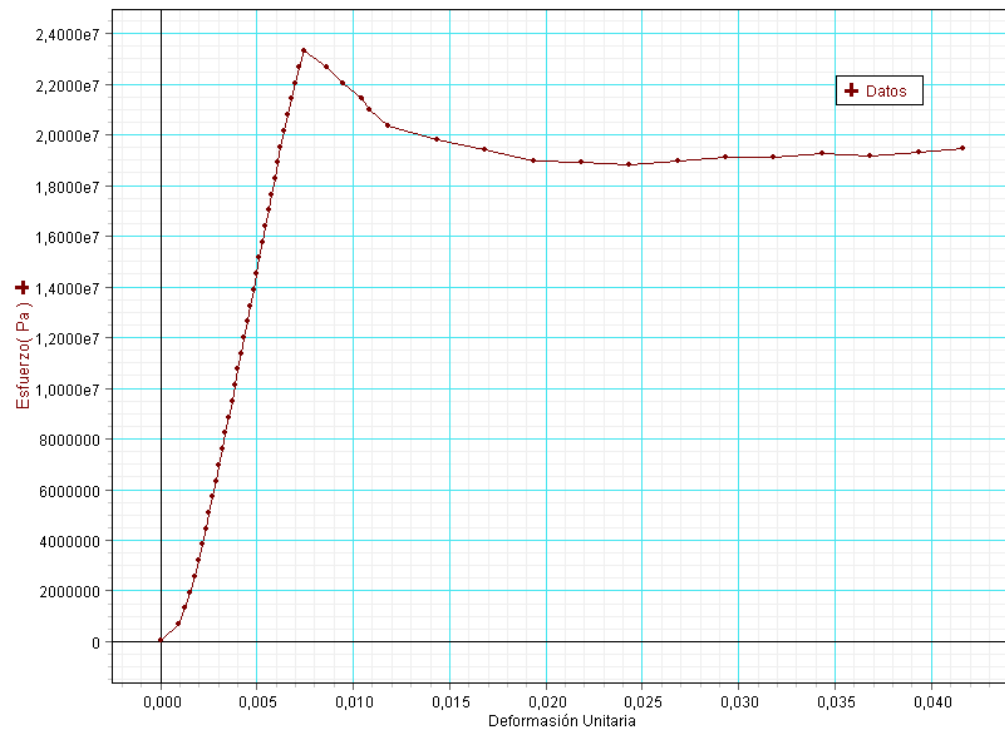
- **Ensayo de compresión axial o paralela al grano.** El procedimiento que se llevo a cabo para la realización del ensayo de compresión para la probeta con fibras paralelas la longitud, se hizo en base a la norma NTC 784. Para la realización de este ensayo se empleo la probeta con la forma y dimensiones indicadas por la norma.

**Figura 58.** Plano de la probeta de ensayo de compresión paralela al grano.



122

**Figura 59.** Comportamiento frágil de la madera sometida a compresión. Grafica de Esfuerzo vs. Deformación.



- **Esfuerzo último por compresión.** La resistencia máxima a la ruptura o también conocida como esfuerzo último por compresión se encontró dividiendo la carga máxima entre la superficie de la sección transversal.

Los resultados obtenidos para el valor de esfuerzo último del material a compresión se presentan a continuación en la tabla 64, que al realizar un análisis estadístico se determina un valor promedio.

**Tabla 64.** Resultados de esfuerzo último por compresión paralela al grano.

Probeta	Carga máxima (N)	Esfuerzo último (MPa)
1	36100	22,6
2	35197	22
3	37603	23,5
4	36585	22,9
5	35599	22,2

**Tabla 65.** Análisis estadístico de los resultados de esfuerzo último por compresión paralela al grano.

<b>Esfuerzo ultimo</b>	
Media (Mpa)	Desviación estándar
22,6	0,58

Como se mencionó anteriormente, al comparar los datos encontrados en este ensayo, se puede determinar que existe una desigualdad importante entre estos dos estudios, esto pudo surgir por diferencias en aspectos como el porcentaje de humedad, tiempo de vida y tiempo en el cual fue cortado el árbol que se utilizó para el análisis.

Debido a que el objetivo de estas pruebas es caracterizar los materiales de los cuales está hecho el carrete No 24, se utilizara el resultado obtenido experimentalmente por la prueba de compresión paralela al grano.

▪ **Modulo de elasticidad obtenido de la prueba.** Utilizando el software DataStudio para calcular este parámetro en este material, el cual corresponde a la pendiente de la grafica esfuerzo vs. deformación unitaria, se obtuvieron los valores presentados a continuación en la tabla 66.

**Tabla 66.** Resultados del modulo de elasticidad a compresión.

<b>Probeta</b>	<b>Modulo de elasticidad (Gpa)</b>
1	3,85
2	3,92
3	3,38
4	3,87
5	3,59

**Tabla 67.** Análisis estadístico de los resultados del modulo de elasticidad.

<b>Módulo de elasticidad</b>	
Media (Gpa)	Desviación estándar
3,72	0,23

Debido a que no se logro encontrar antecedentes de resultados de modulo de elasticidad en pruebas de compresión para la madera tipo Sajo, se decidió tomar los resultados obtenidos por esta prueba, para realizar la caracterización de uno de los materiales del cual está hecho el carrete de madera No 24.

- **Elongación en la prueba.** El calculo de la elongación se realizo a partir de la relación que existe entre la distancia en que se encuentran las mordazas al iniciar la prueba y al terminarla (Deformación %).

En la tabla 68 se muestra los valores de deformación porcentual de las pruebas realizadas en este ensayo.

**Tabla 68.** Resultados de la deformación porcentual. Ensayo de compresión paralela al grano.

Probeta	Deformación (%)
1	1,46
2	1,5
3	1,43
4	1,43
5	1,78

**Tabla 69.** Resultados de la deformación porcentual. Ensayo de compresión paralela al grano.

% de Deformación	
Media (%)	Desviación estándar
1,5	0,1

Debido a que no se logro encontrar antecedentes de resultados de elongación en pruebas de compresión para la madera tipo Sajo, se decidió tomar los resultados obtenidos por esta prueba, para realizar la caracterización de uno de los materiales del cual está hecho el carrete de madera No 24.

## 8.4 COMPARACIÓN DE LAS PRUEBAS MECÁNICAS ENTRE EL SAJO Y EL POLI ALUMINIO

Es necesario comparar los resultados obtenidos de los ensayos mecánicos para la madera sajo y para el poli aluminio, y determinar la semejanza y/o diferencia entre estas, con el fin de verificar que tan favorable es el comportamiento mecánico de este nuevo material reciclado de tetra pak, el poli aluminio.

### 8.4.1 Comparación de la prueba de tensión.

- **Poli aluminio y madera en sentido paralelo al grano.** En la tabla 69 se presentan los valores correspondientes al esfuerzo máximo para el poli aluminio y para la madera en el sentido párlelo al grano.

**Tabla 70.** Resistencia máxima a la tracción, poli aluminio y madera paralela al grano.

Resistencia máxima		
Madera (Mpa)	Poli aluminio (Mpa)	% Diferencia
113	6.431	94.309

En la tabla 71 se presentan los valores correspondientes al modulo de elasticidad para el poli aluminio y para la madera en el sentido paralelo al grano.

**Tabla 71.** Modulo de elasticidad a tensión, poli aluminio y madera paralelo al grano.

Modulo de elasticidad a tensión		
Madera (Mpa)	Poli aluminio (Mpa)	% Diferencia
12200	539.833	95.575

En la tabla 72 se presentan los valores correspondientes al porcentaje de elongación para el poli aluminio y para la madera en el sentido paralelo al grano.

**Tabla 72.** Porcentaje de elongación, poli aluminio y madera paralelo al grano.

<b>Elongación</b>		
Madera (%)	Poli aluminio (%)	% Diferencia
1.100	4.170	73.621

Son notables las grandes diferencias que se presentan en los resultados correspondientes a los valores de esfuerzo máximo, modulo de elasticidad y elongación, entre el poli aluminio y la madera en sentido paralelo al grano, siendo muy superiores las propiedades mecánicas de la madera en este sentido frente a las del poli aluminio.

- **Poli aluminio y madera en sentido perpendicular al grano.** En la tabla 73 se presentan los valores correspondientes al esfuerzo máximo para el poli aluminio y para la madera en el sentido perpendicular al grano.

**Tabla 73.** Resistencia máxima a la tracción, poli aluminio y madera perpendicular al grano.

<b>Resistencia maxima</b>		
Madera (Mpa)	Poli aluminio (Mpa)	% Diferencia
1.670	6.431	74.032

En la tabla 74 se presentan los valores correspondientes al modulo de elasticidad para el poli aluminio y para la madera en el sentido perpendicular al grano.

**Tabla 74.** Modulo de elasticidad a tensión, poli aluminio y madera perpendicular al grano.

<b>Modulo de elasticidad a tensión</b>		
Madera (Mpa)	Poli aluminio (Mpa)	% Diferencia
240.000	539.833	55.542

En la tabla 75 se presentan los valores correspondientes al porcentaje de elongación para el poli aluminio y para la madera en el sentido perpendicular al grano.

**Tabla 75.** Porcentaje de elongación, poli aluminio y madera perpendicular al grano.

<b>Elongación</b>		
Madera (%)	Poli aluminio (%)	% Diferencia
0.900	4.170	78.417

Son notables las grandes diferencias que se presentan en los resultados correspondientes a los valores de esfuerzo máximo, modulo de elasticidad y elongación, entre el poli aluminio y la madera en sentido perpendicular al grano, pero en este caso son superiores las propiedades mecánicas del poli aluminio frente a la madera en este sentido.

**8.4.2 Comparación de la prueba de compresión.** En la tabla 76 se presentan los valores correspondientes al esfuerzo máximo para el poli aluminio y para la madera en el sentido paralela al grano.

**Tabla 76.** Resistencia máxima a la tracción, poli aluminio y madera paralela al grano.

<b>Resistencia máxima a compresión</b>		
Madera (Mpa)	Poli aluminio (Mpa)	% diferencia
22.600	17.533	22.420

En la tabla 77 se presentan los valores correspondientes al modulo de elasticidad a compresión para el poli aluminio y para la madera en el sentido paralelo al grano.

**Tabla 77.** Modulo de elasticidad a compresión, poli aluminio y madera paralelo al grano.

<b>Módulo de elasticidad a compresión</b>		
Madera (Mpa)	Poli aluminio (Mpa)	% diferencia
3720.000	104.184	97.199

En la tabla 78 se presentan los valores correspondientes al porcentaje de compresión para el poli aluminio y para la madera en el sentido paralelo al grano.



**Tabla 78.** Porcentaje de compresión, poli aluminio y madera paralelo al grano.

<b>Compresión</b>		
Madera (%)	Poli aluminio (%)	% diferencia
1.500	19.990	92.496

Son notables las grandes diferencias que se presentan en los resultados correspondientes a los valores de esfuerzo máximo, modulo de elasticidad y elongación, entre el poli aluminio y la madera en sentido paralelo al grano, tanto en el ensayo de tensión como en el de compresión, lo cual aumenta la necesidad de realizar la simulación por medio de elementos finitos para establecer la efectividad del poli aluminio y garantizar que este satisfaga los requerimientos del carrete para la aplicación que este tiene en la industria.

## **9. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ELEMENTOS FINITOS**

Los programas de dibujo y de simulación asistidos por computador son herramientas muy importantes que brindan grandes ventajas en el estudio y análisis de piezas mecánicas y/o componentes de maquinas, ya que son altamente ágiles, confiables y de gran versatilidad en los campos de acción.

Las herramientas computacionales permiten evaluar piezas de gran complejidad con mayor facilidad que los métodos analíticos convencionales; además se pueden realizar diferentes estudios para una misma pieza sin necesidad de realizar grandes cambios o procesos dispendiosos.

Es importante conocer todos los beneficios que ofrecen las herramientas computacionales para el diseño mecánico, ya que permiten obtener resultados importantes para la toma de decisiones desde el punto de vista de ingeniería que conlleven a diseños más seguros y confiables.

El análisis por elementos finitos es un método informático que permite predecir el comportamiento de los objetos reales y sus reacciones ante fuerzas, calor, vibración, etc., es decir, si funcionarán de la manera para la que fueron diseñados.

Este tipo de análisis tiene grandes ventajas para el diseño y trabajo de ingeniería, presentando las siguientes características:

- Es una herramienta avanzada de análisis y predicción, que permite crear diseños seguros, eficientes y económicos.
- Con el FEA, los ingenieros pueden analizar las tensiones y desplazamientos experimentados por piezas complejas al someterlas a cargas estáticas o dinámicas de naturaleza constante o variable en el tiempo.
- Analizar efectos de las deflexiones provocadas por cargas utilizando diversos modelos de materiales lineales y no lineales.
- El FEA puede emplearse también para analizar los efectos de las cargas térmicas sobre las piezas.

Esta técnica se denomina análisis, pero dentro del ciclo de diseño de un producto se emplea principalmente para predecir lo que ocurrirá cuando el producto se encuentre en funcionamiento.

El método de los elementos finitos funciona subdividiendo un objeto real en un gran número (miles o centenares de miles) de elementos con forma de bloques diminutos; El comportamiento de cada uno de estos pequeños elementos, que tienen una forma regular, puede predecirse fácilmente mediante unas ecuaciones matemáticas. El ordenador se encarga de agregar todos los comportamientos individuales para predecir el comportamiento de todo el objeto. El término 'finito' de la expresión 'análisis por elementos finitos' refleja la idea de que en un modelo de elementos finitos existe un número finito de elementos.

El método de elementos finitos se utiliza para predecir el comportamiento de las cosas ante prácticamente cualquier fenómeno físico:

- Tensión mecánica (análisis de tensión).
- Vibración mecánica.
- Transferencia de calor (conducción, convección y radiación).
- Flujo de fluidos (tanto líquidos como gaseosos).
- Diversos fenómenos eléctricos y magnéticos.
- Acústica.

Es importante contextualizar el análisis por elementos finitos dentro del proceso de diseño de ingeniería, el cual es un proceso en el que se determinan los efectos que pueden tener los fenómenos físicos en el sistema de estudio, por medio de las leyes fundamentales de la física, para obtener finalmente un prototipo que sea dinámico, ágil y confiable frente a los efectos que tendrá que soportar.

El análisis de elementos finitos juega un papel importante en la retroalimentación del proceso de diseño que permite realizar un diseño detallado guiado por las especificaciones de diseño y que garantice la confiabilidad y seguridad del sistema, ya que ofrece la posibilidad de simular los efectos reales a los cuales estará sometido este y determinar el comportamiento y efectividad que este tenga dentro del contexto en el que se desempeñará.

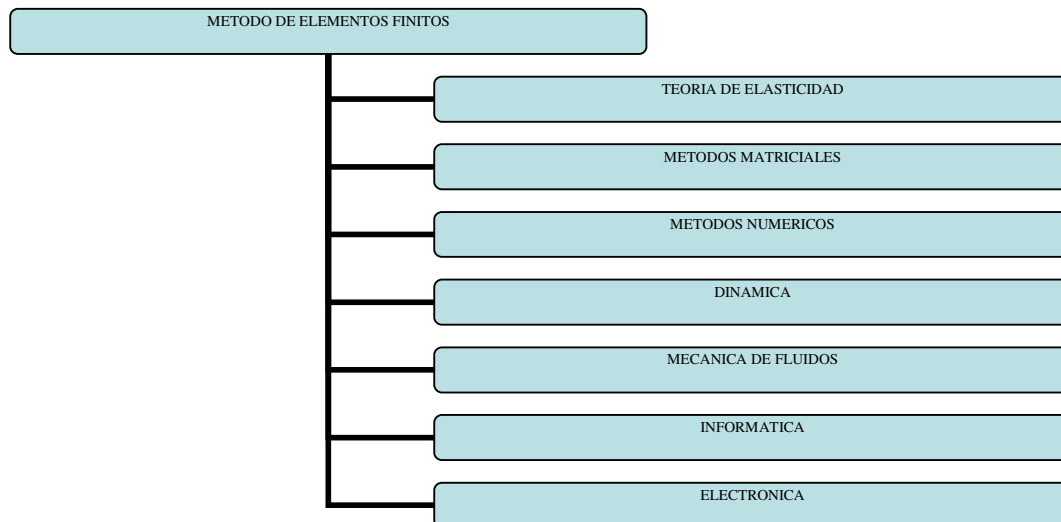
Los elementos finitos permiten dar solución a los problemas o sistemas mediante el método numérico, el cual se puede comparar frente al analítico y concluir que los resultados son bastante aproximados pese a la diferencia en el método aplicado para la solución de estos, como se muestra en la tabla 79.

**Tabla 79.** Comparación entre los tipos de solución.

<b>Solución numérica</b>	<b>solución analítica</b>
Se trabajan con las ecuaciones generales que describen el comportamiento físico de un sistema, obteniendo una solución general.	Se da solución a cada uno de los problemas que conforman el conjunto y así se obtiene finalmente la solución de todo el sistema.
<b>Métodos de solución.</b>	<b>Métodos de solución</b>
Solucionar las ecuaciones diferenciales del sistema, realizar aproximaciones mediante series y/o aplicar el método de energías	Métodos de las diferencias finitas, de los elementos de frontera y de los elementos finitos.

El método de los elementos finitos es una técnica que integra diferentes campos de la ingeniería, como se muestra en la figura 60.

**Figura 60.** Integración de diferentes campos de la ingeniería.



## 9.1 PROCEDIMIENTO DE ANALISIS

Para realizar un análisis mediante este método es necesario implementar un procedimiento de análisis adecuado para obtener los resultados esperados, el cual debe seguir los pasos presentados a continuación:

- ✓ Realizar un modelo geométrico del sistema.
- ✓ Generar una malla.
- ✓ Asignar atributos.
- ✓ Definir tipos de análisis. Las posibilidades son las siguientes:
  - ❖ Análisis lineal estático de esfuerzos.
  - ❖ Análisis No lineal estático de esfuerzos.
  - ❖ Simulación de eventos mecánicos.
  - ❖ Análisis de fatiga.
  - ❖ Análisis de frecuencias naturales y formas modales.
  - ❖ Transferencia de calor en estado estable.
  - ❖ Transferencia de calor en estado transitorio.
  - ❖ Análisis de fluidos en estado estable.
  - ❖ Análisis de fluidos en estado inestable.
  - ❖ Análisis de pandeo.
  - ❖ Análisis de campos electrostáticos.
- ✓ Visualizar resultados.
- ✓ Evaluación y resultados.

## 9.2 VENTAJAS DE LOS ELEMENTOS FINITOS

El método de análisis de sistemas por elementos finitos presenta grandes ventajas frente al método analítico de las cuales las principales son las siguientes:

- ✓ El método de elementos finitos es más versátil y efectivo en sistemas que de alta complejidad.
- ✓ El método de elementos finitos disminuye la necesidad de realizar pruebas de laboratorio al sistema físico que se está analizando.
- ✓ Permite optimizar los diseños reduciendo costos y tiempo en el proceso de diseño.
- ✓ Permite evaluar el sistema en diferentes escenarios, ofreciendo mayor efectividad en el diseño.
- ✓ Tiene gran campo de aplicación, en la industria aeronáutica, automotriz y biomédica entre otras, en las cuales se pueden realizar tanto cálculos de esfuerzos como simulaciones de eventos mecánicos.
- ✓ Evita realizar grandes modificaciones en las etapas iniciales del diseño.
- ✓ Permite realizar los análisis en un menor tiempo.
- ✓ Esta metodología permite contribuir en el proceso de diseño de manera predictiva, logrando obtener piezas de mayor calidad y con menor tiempo de salida al mercado.

En este contexto el análisis por elementos finitos ofrece grandes ventajas ya que permite evaluar el comportamiento mecánico del carrete, por medio de la simulación, bajo las condiciones de trabajo a las cuales estará sometido, y obtener resultados muy aproximados a la realidad, los cuales son una herramienta clave para determinar la aprobación o rechazo de este producto, evitando de esta forma graves accidentes y daños en la industria.

### **9.3 SIMULACION DEL CARRETE POR EL METODO DE ELEMENTOS FINITOS**

El modelo del carrete se realizó por medio del software Algor V21.1, según las medidas y especificaciones dadas en los planos por el fabricante (ver anexo A), definiendo toda la estructura como elementos tipo viga y el cuerpo del carrete como elementos tipo placa, ya que de esta forma se logra obtener resultados muy aproximados, tanto como al realizar el modelo del carrete en un software de dibujo, y las simulaciones se realizan en un menor tiempo.

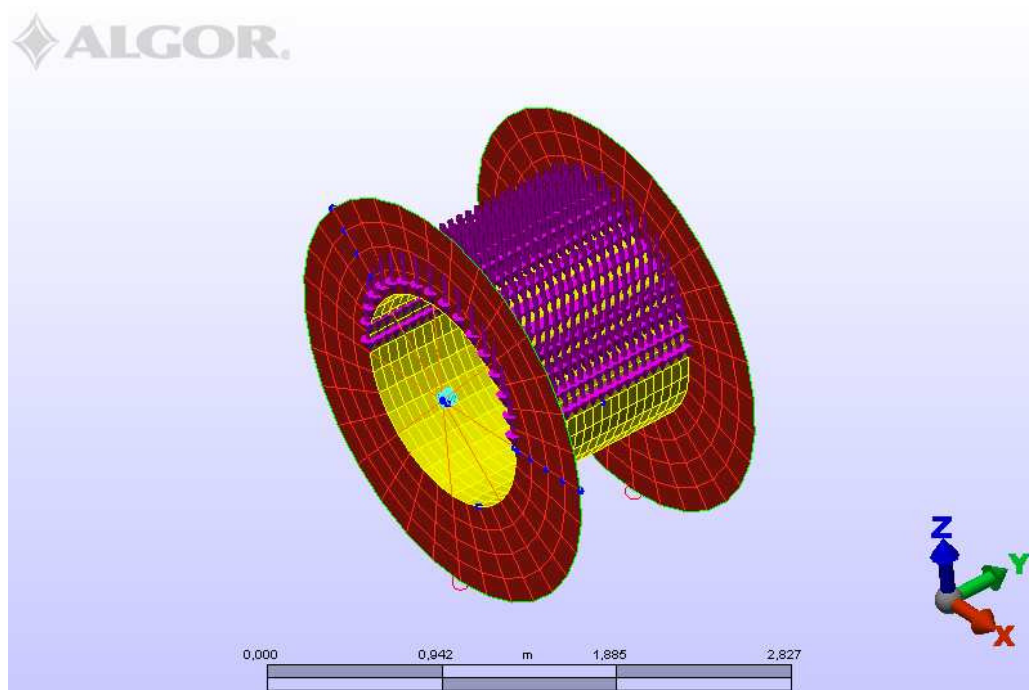
En este diseño no se tuvo en cuenta la soldadura ya que el material del cordón de soldadura debe tener una resistencia mayor a la de las uniones soldadas para garantizar el óptimo funcionamiento del carrete, y las propiedades de los materiales definidos para cada pieza del carrete se introdujeron en el software de acuerdo con los resultados obtenidos experimentalmente tanto para el acero ASTM A-36 como para el poli aluminio.

Todos los análisis de esfuerzos se realizaron aplicando el criterio de Von Misses ya que en las pruebas de laboratorio se logro obtener el esfuerzo último de cada uno de los materiales estudiados en este caso.

La carga aplicada corresponde a la carga máxima del cable especificada para esta referencia la cual es de 6850kg, Con el animo de simular las diferentes condiciones de trabajo se analizaron 3 casos en los cuales se verifican los esfuerzos y desplazamientos para diferentes restricciones las cuales corresponden a el carrete en su condición normal, el carrete levantado por un montacargas y el carrete sostenido por el buje para empaacar el cable en el, también se simulo la caída del carrete desde 1 metro de altura, con lo cual se cubrirían las diferentes condiciones de trabajo de este en su desempeño en la industria.

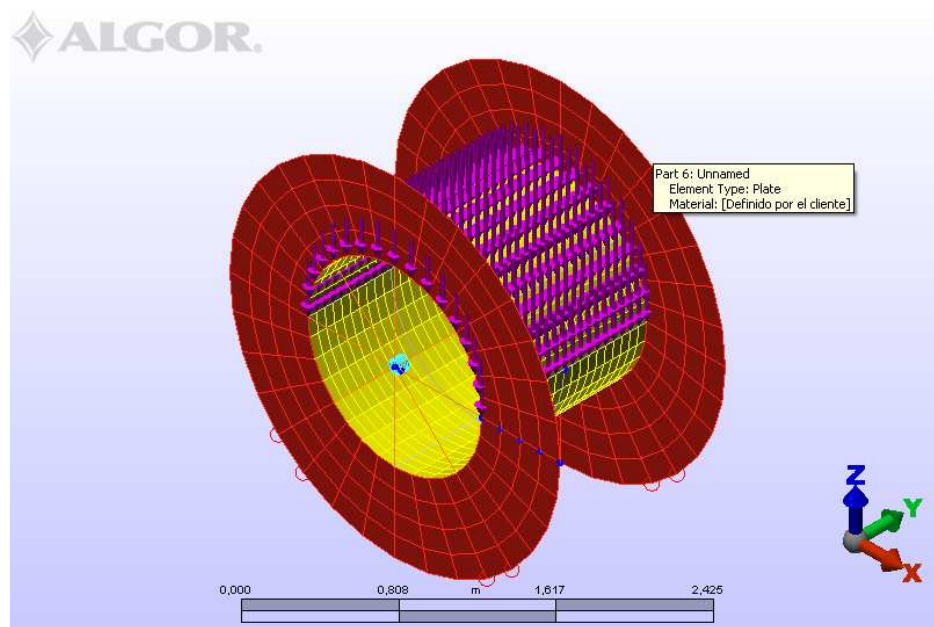
### 9.3.1 Análisis y resultados de los esfuerzos presentados en el carrete.

**Figura 61.** Carrete en condición normal de trabajo.



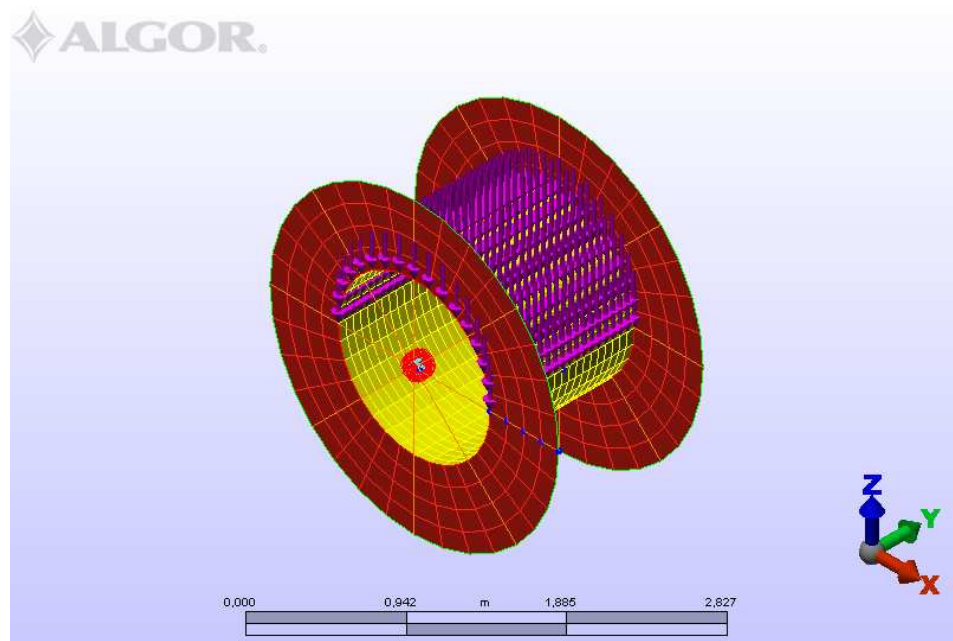
Realizado en el Software de análisis de elementos finitos, Algor V.19

**Figura 62.** Carrete levantado por el montacargas.



Realizado en el Software de análisis de elementos finitos, Algor V.19

**Figura 63.** Carrete restringido en el buje.



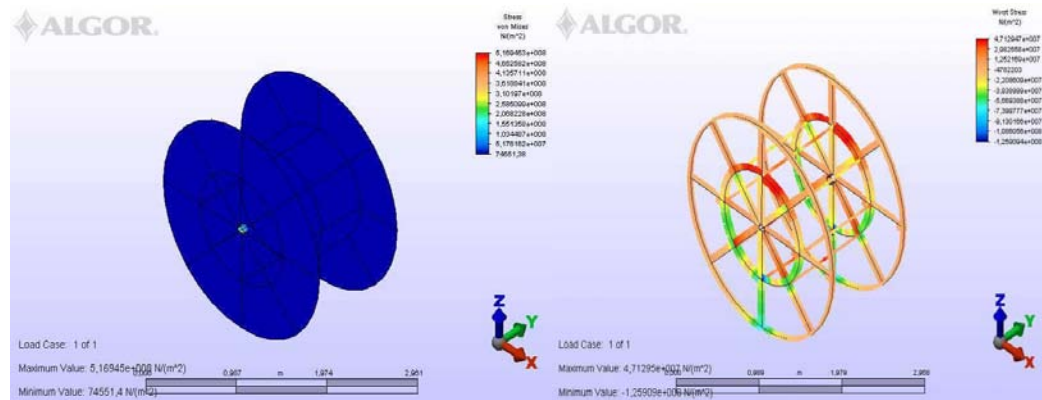
Realizado en el Software de análisis de elementos finitos, Algor V.19



- **Esfuerzos en el carrete en condición normal de trabajo.** Según el análisis realizado por Von Mises el máximo esfuerzo que presenta este material (poli aluminio) es de 516,34MPa y el mínimo es de 74551,4Pa, siendo los máximos valores registrados en las tres condiciones de trabajo estudiadas.

Mientras que la estructura presenta un valor máximo de 47,129MPa, mucho más bajo que el presentado en el cuerpo del tambor, y representan los valores de esfuerzo medios registrados en las tres condiciones de trabajo.

**Figura 64.** Esfuerzos en el carrete en condición normal de trabajo.

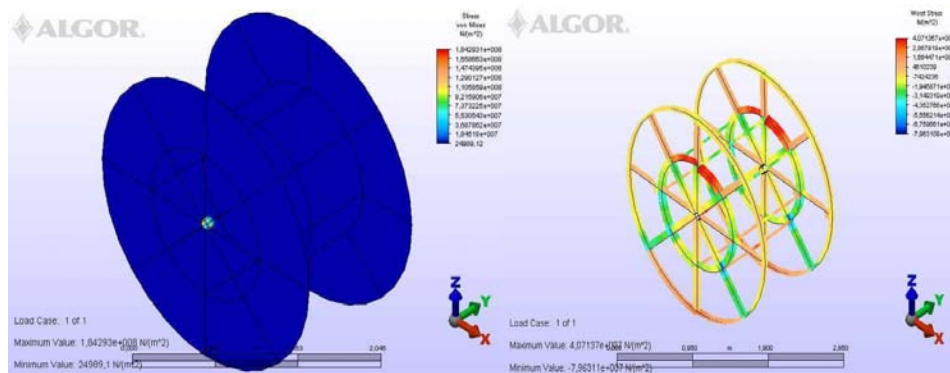


Realizado en el Software de análisis de elementos finitos, Algor V.19

- **Esfuerzos en el carrete bajo la acción del montacargas.** Según el análisis realizado por Von Mises el máximo esfuerzo que presenta este material (poli aluminio) es de 184,293MPa y el mínimo es de 24989,1Pa, siendo los valores medios de esfuerzos registrados por el carrete en las tres condiciones.

Mientras que la estructura presenta un valor máximo de 40,714MPa, el cual sigue siendo inferior al presentado en el cuerpo del carrete, y son los valores más bajos de las tres simulaciones.

**Figura 65.** Esfuerzos en el carrete bajo la acción del montacargas.

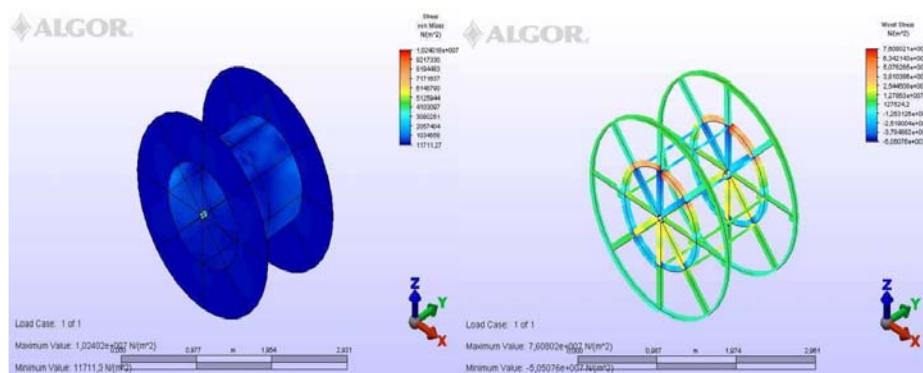


Realizado en el Software de análisis de elementos finitos, Algor V.19

- **Esfuerzos en el carrete restringido en el buje.** Según el análisis realizado por Von Mises el máximo esfuerzo que presenta este material (poli aluminio) es de 10,240MPa y el mínimo es de 11711,3Pa, comparado con los demás esfuerzos presentados en las simulaciones anteriores es el que presenta los valores más bajos.

Mientras que la estructura presenta un valor máximo de 76,080MPa, el cual representa los valores más altos de las tres condiciones de trabajo ya que en este caso es la estructura la que soporta la mayor parte del peso del conjunto.

**Figura 66.** Esfuerzos en el carrete restringido en el buje.



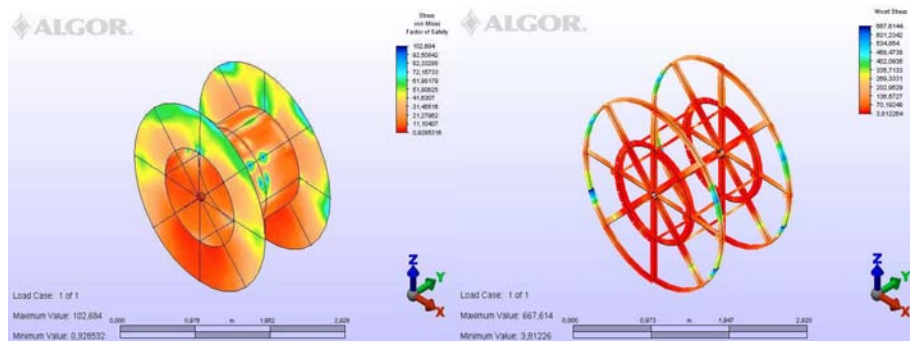
Realizado en el Software de análisis de elementos finitos, Algor V.19

### 9.3.2 Análisis y resultados del factor de seguridad presentado en el carrete.

- **Factor de seguridad en el carrete en condición normal de trabajo.** En esta condición de trabajo se presenta un factor de seguridad muy bajo e inaceptable en el cuerpo del carrete, el cual es de 0.9, este se presenta en el tambor ya que es esta pieza la que soporta el peso del cable, y es en esta condición de trabajo en la que se presentaron los máximos valores de esfuerzos, comparados con las otras simulaciones.

En la estructura se presenta un factor de seguridad muy aceptable, de 3,8, por lo cual se puede concluir que el poli aluminio esta presentando problemas para soportar la carga requerida en esta condición de diseño.

**Figura 67.** Factor de seguridad en condición normal del trabajo.



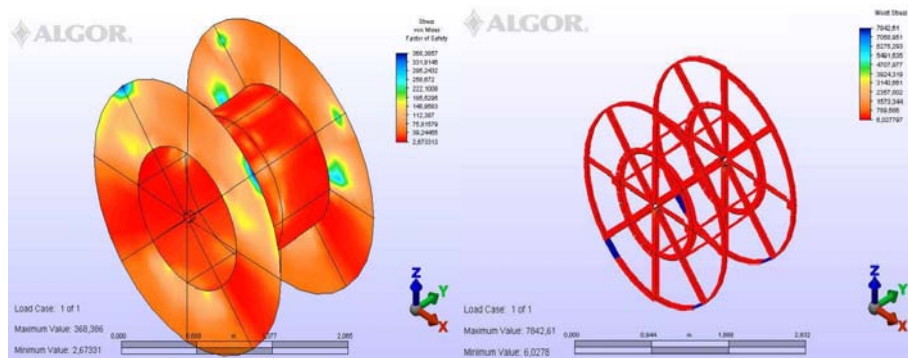
Realizado en el Software de análisis de elementos finitos, Algor V.19

- **Factor de seguridad en el carrete bajo la acción del montacargas.** En esta condición de trabajo se presenta un factor de seguridad bastante adecuado en el cuerpo del carrete, el cual es de 2,67, el cual se presenta principalmente en el tambor, y en las tapas tiene un factor de seguridad de 35.

En la estructura se presenta un factor de seguridad muy aceptable, de 6, por lo cual se puede concluir que los materiales tienen un comportamiento aceptable bajo estas condiciones de trabajo para este diseño de carrete.

Se puede considerar que el comportamiento del carrete en esta condición se encuentra en un rango de trabajo adecuado.

**Figura 68.** Factor de seguridad bajo la acción del montacargas.



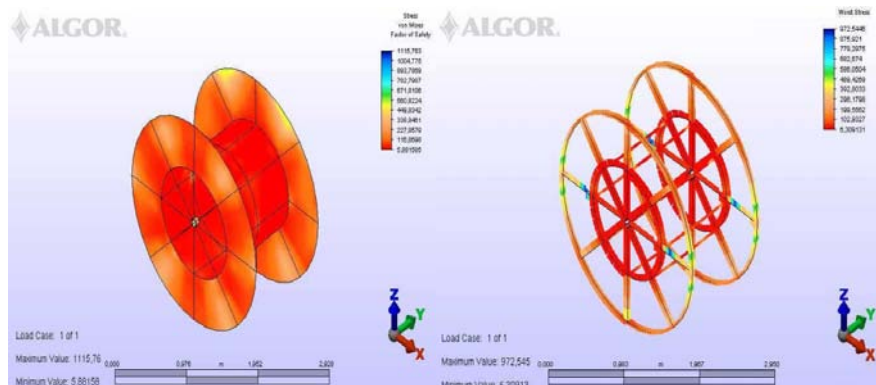
Realizado en el Software de análisis de elementos finitos, Algor V.19

- **Factor de seguridad en el carrete restringido en el buje.** En esta condición de trabajo se presenta un factor de seguridad adecuado en el cuerpo del carrete, el cual es de 5,88, lo cual es consistente con los valores de esfuerzos presentados en estas condiciones ya que eran los más bajos de los tres casos presentados.

En la estructura se presenta un factor de seguridad muy aceptable, de 6,3 el valor más bajo, por lo cual se puede concluir que los materiales tienen un comportamiento aceptable bajo estas condiciones de trabajo para este diseño de carrete.

Se puede considerar que el comportamiento del carrete en esta condición se encuentra en un rango de trabajo adecuado.

**Figura 69.** Factor de seguridad restringido en el buje.

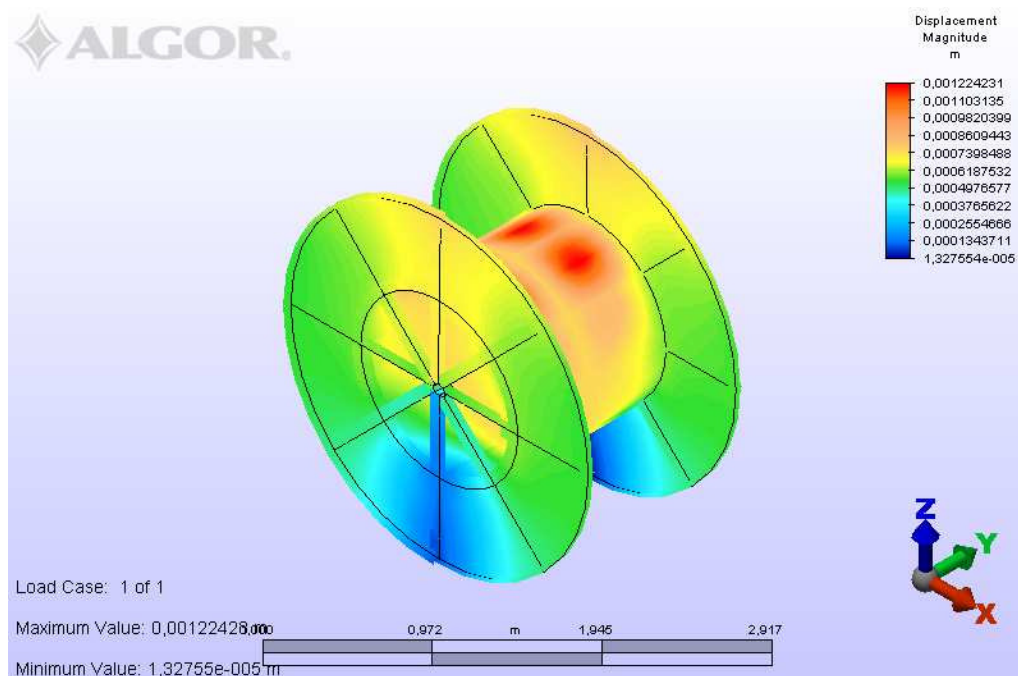


Realizado en el Software de análisis de elementos finitos, Algor V.19

### 9.3.3 Análisis y resultados de los desplazamientos presentados en el carrete.

- **Desplazamiento en el carrete en la condición normal de trabajo.** En esta condición de trabajo se presenta un desplazamiento máximo de 0,001m y uno mínimo de  $1,3 \times 10^{-5}$ m lo cual es bastante aceptable ya que no representa ningún factor de riesgo desde este aspecto; y es consistente con los valores de factor de seguridad presentados en estas condiciones ya que eran los más bajos de los tres casos presentados, y en este caso se presentan las mayores deformaciones.

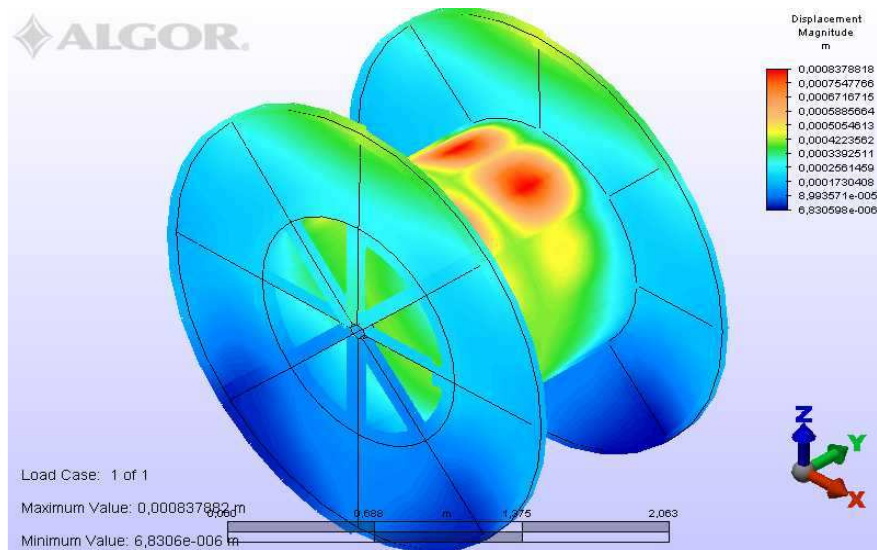
**Figura 70.** Desplazamientos en el carrete en la condición normal de trabajo.



Realizado en el Software de análisis de elementos finitos, Algor V.19

- **Desplazamiento en el carrete bajo la acción del montacargas.** En esta condición de trabajo se presenta un desplazamiento máximo de 0,0008m y uno mínimo de  $6,8 \times 10^{-6}$ m lo cual es bastante aceptable ya que no representa ningún factor de riesgo desde este aspecto; y es consistente con los valores de factor de seguridad presentados en estas condiciones ya que eran los medios de los tres casos presentados, al igual que en este caso en el que se presentan las deformaciones medias.

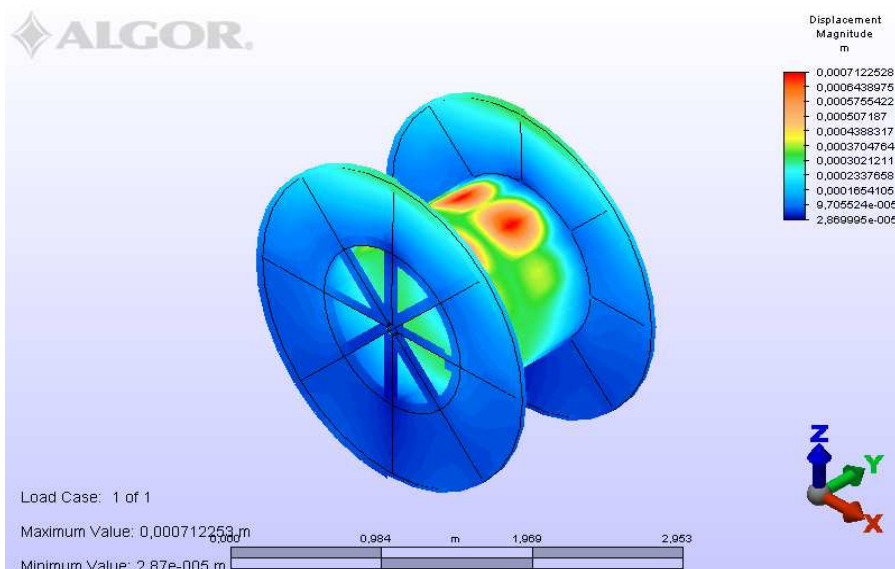
**Figura 71.** Desplazamiento en el carrete bajo la acción del montacargas.



Realizado en el Software de análisis de elementos finitos, Algor V.19

- **Desplazamiento en el carrete restringido en el buje.** En esta condición de trabajo se presenta un desplazamiento máximo de 0,0007m y uno mínimo de  $2,8 \times 10^{-5}$  m lo cual es bastante aceptable ya que no representa ningún factor de riesgo desde este aspecto; y es consistente con los valores de factor de seguridad presentados en estas condiciones ya que eran los más altos de los tres casos presentados, y en este caso se presentan las deformaciones más bajas.

**Figura 72.** Desplazamiento en el carrete restringido en el buje.



Realizado en el Software de análisis de elementos finitos, Algor V.19

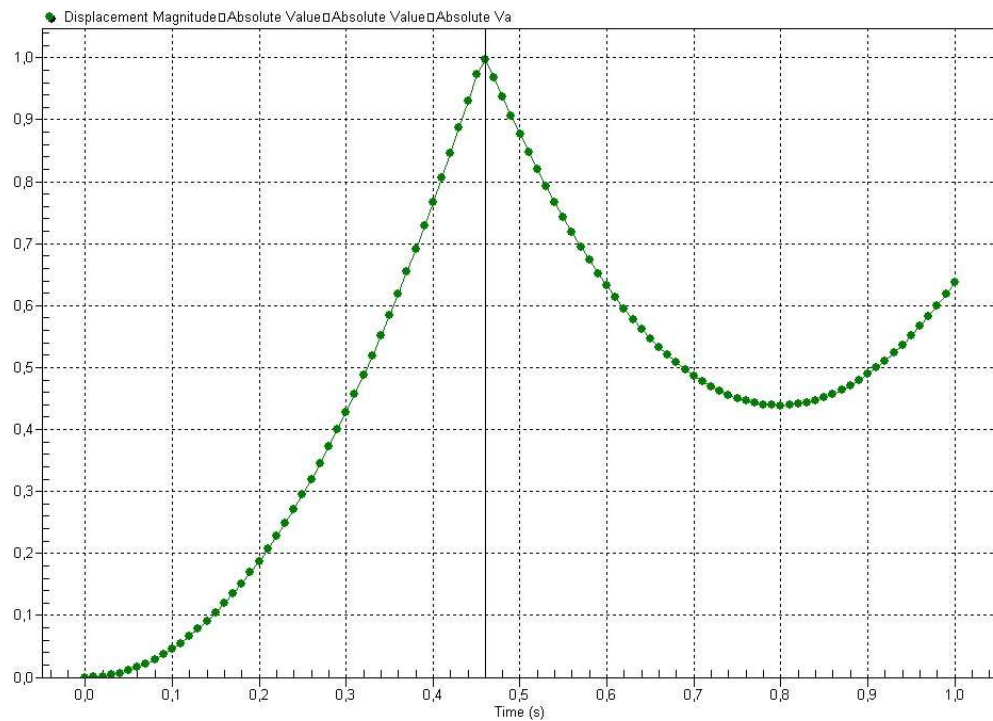


### 9.3.4 Análisis y resultados de la caída del carrete.

Se realizó la simulación de la caída del carrete desde 1 metro de altura con la carga máxima del cable especificada para esta referencia (6850Kg) y al igual que en los tres casos anteriores se evaluaron los esfuerzos, factor de seguridad y desplazamientos producidos en el momento del impacto.

En la figura 85 se puede muestra la curva de distancia en el eje y medida en metros Vs. El tiempo en el eje x medido en segundos, y se puede apreciar que el impacto ocurre en 0,46s.

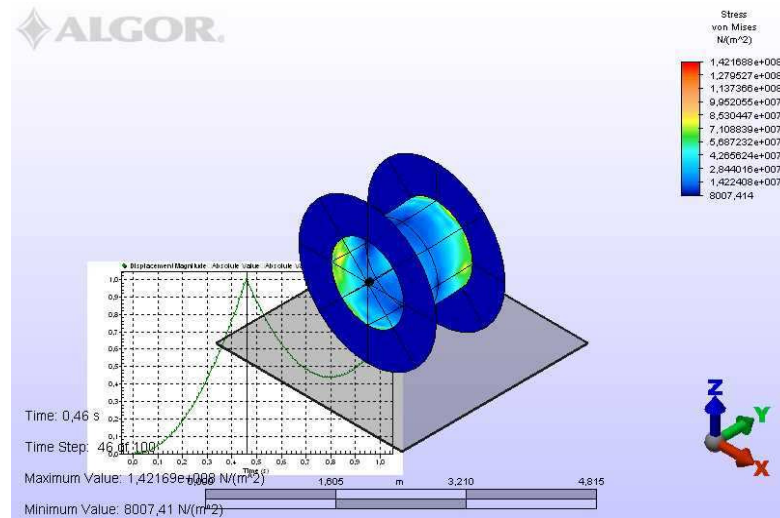
**Figura 73.** Grafica de Distancia Vs. Tiempo.



- Resultados de esfuerzos en el carrete en el momento del impacto.

Se presentan valores de esfuerzo entre 142,169MPa y 8007,41Pa en el momento del impacto, como se puede ver en la figura 75.

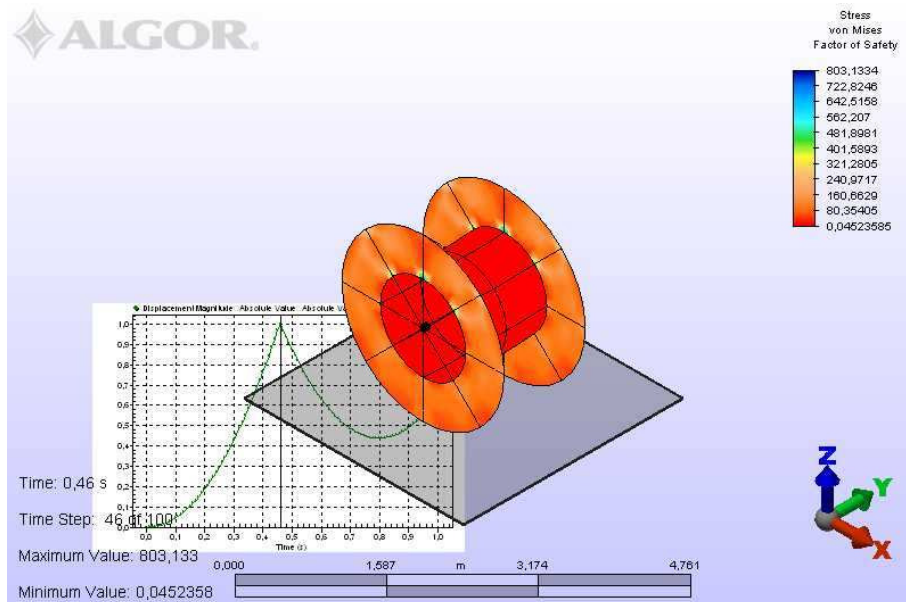
**Figura 74.** Esfuerzos en el carrete en la caída desde 1 metro de altura.



Realizado en el Software de análisis de elementos finitos, Algor V.19

- **Resultados del factor de seguridad en el carrete en el momento del impacto.** Se presenta un factor de seguridad de 0,04 en el momento del impacto, lo cual es un valor inaceptable desde el punto de vista de diseño ya que indica una falla total del carrete en esta condición de trabajo.

**Figura 75.** Factor de seguridad en el carrete en la caída desde 1 metro de altura.



Realizado en el Software de análisis de elementos finitos, Algor V.19



## 9.4 MODELO TEÓRICO

Una vez obtenidos los resultados de esfuerzos, desplazamientos y factores de seguridad, por medio del método de elementos finitos, aplicado con el software Algor V21.1, en cada una de las condiciones de trabajo dispuestas para el carrete, es importante validar este análisis comparando estos resultados con los obtenidos al aplicar otra metodología, en este caso con un modelo teórico del carrete.

Para realizar el modelo teórico del carrete es necesario considerar la peor condición que se pueda presentar en el carrete y realizar una aproximación al modelo real, ya que con esta metodología se dificulta la simulación de todas las condiciones de trabajo, y del sistema como tal, de tal modo que si se analiza la situación más crítica se pueden garantizar los resultados para el resto de las condiciones de trabajo.

La aproximación del carrete para aplicar este modelo teórico se realizó considerando para el análisis del tambor una sección de este correspondiente a una duela, y la respectiva carga distribuida que actúa sobre esta, restringiéndola completamente en los extremos como realmente trabaja en la realidad y evaluando su comportamiento crítico el cual sería la condición de flexión.

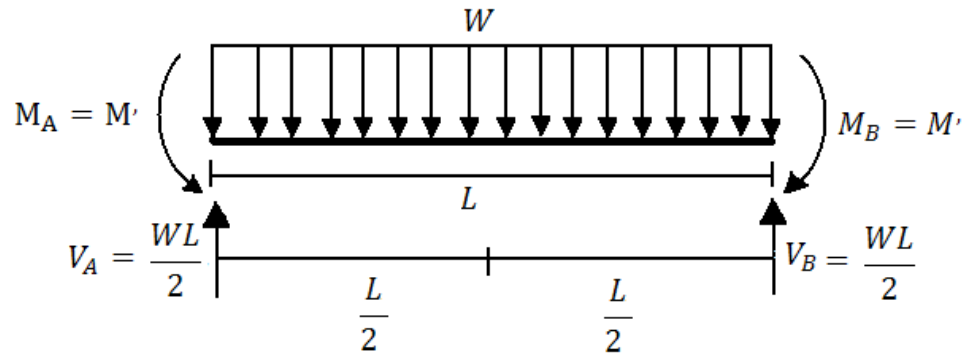
Para el análisis de la estructura del carrete se considero la condición más crítica para el carrete que sería cuando toda la carga del cable actúa sobre un radio en cada tapa de este, de tal forma que estos estén dispuestos de forma vertical y se puedan aproximar a una columna empotrada en los dos extremos. De esta forma a continuación se presenta el análisis de cada una de estas situaciones aplicando los conceptos de ingeniería mecánica correspondientes a la resistencia de materiales y al diseño mecánico.

**9.4.1 Modelo teórico para el tambor.** Inicialmente se debe calcular la carga correspondiente a la sección del tambor seleccionada; El peso total del cable que soporta el tambor es de 6850kg, el cual en el Algor se distribuyó equitativamente entre los nodos del tambor, los cuales son en total 320 de modo que a cada nodo le corresponde una carga de 21,406Kg y si se tiene en cuenta que a cada duela le corresponden 20 nodos, la carga de esta sería de 428,12Kg que corresponden a 4199,857N.

Esta carga no se puede aplicar de forma puntual sino uniformemente distribuida en la sección del tambor, la cual tiene una longitud de 1,2m por lo cual esta sería de 3499,88N/m.

En la figura 77 se presenta el diagrama de cuerpo libre de esta aproximación.

**Figura 76.** Diagrama de cuerpo libre de la aproximación del tambor.



Donde  $W = 3499,88\text{N/m}$  y  $L = 1,2\text{m}$

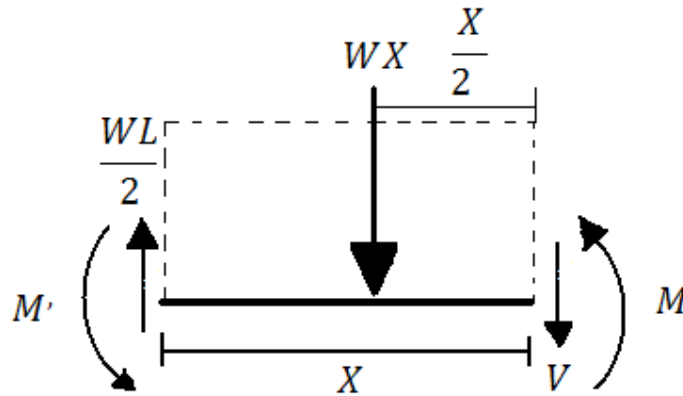
Al realizar la sumatoria de fuerzas en Y se encuentran los valores de las reacciones  $V_A$  y  $V_B$  lo cuales se pueden obtener gracias a la simetría del sistema.

$$V_A = V_B = \frac{WL}{2} = \frac{(3499,88\text{N/m})(1,2\text{m})}{2} = 2099,933\text{N}$$

Al realizar la sumatoria de momentos se puede identificar que este es un problema estáticamente indeterminado, por lo cual es necesario abordarlo con la metodología de deflexión en vigas y ejes aplicando el cálculo de la pendiente y desplazamiento por integración.

Se toma un tramo de la sección como se muestra en la figura 78, se realiza la sumatoria de momentos en el punto de corte y se expresa  $M$  como  $M'$ .

**Figura 77.** Diagrama de cuerpo libre en la sección de corte.



$$M_A = M_B = M'$$

$$\sum M = 0 = M + \frac{Wx^2}{2} - \frac{WLx}{2} + M'$$

$$M = \frac{WLx}{2} - \frac{Wx^2}{2} - M'$$

Aplicando la ecuación de la metodología de deflexión en vigas y ejes, en función de la ecuación de la ecuación de momento obtenida para este caso en particular e integrando dos veces se tiene lo siguiente:

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = M(x)$$

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{WLx}{2} - \frac{Wx^2}{2} - M'$$

$$EI \frac{dy}{dx} = \frac{WLx^2}{4} - \frac{Wx^3}{6} - M'x + c_1$$

$$EIV = \frac{WLx^3}{12} - \frac{Wx^4}{24} - \frac{M'x^2}{2} + c_1x + c_2$$

Una vez se tiene esta ecuación de la deflexión en función de la longitud es necesario evaluar las condiciones de frontera que se presentan en este sistema.

- La deflexión debe ser cero en los extremos de la viga, ya que en estos puntos esta empotrada, de tal forma que:

Cuando  $V=0$ ,  $X=0$

$$EI \times 0 = \frac{WL \times 0}{12} - \frac{W \times 0}{24} - \frac{M^1 \times 0}{2} + c_1 \times 0 + c_2$$

$$c_2 = 0$$

- De igual forma el valor de la pendiente debe ser cero en estos puntos, de tal forma que:

•

Cuando  $X = 0$ ,  $\frac{dy}{dx} = 0$

$$EI \times 0 = \frac{WL \times 0}{4} - \frac{W \times 0}{6} - M^1 \times 0 + c_1$$

$$c_1 = 0$$

- Cuando  $X = L$ ,  $V = 0$ , de tal forma que :

$$EI \times 0 = \frac{WL^4}{12} - \frac{WL^4}{24} - \frac{M^1 L^2}{2} + 0 + 0$$

$$0 = \frac{WL^4}{24} - \frac{M^1 L^2}{2}$$

$$0 = \frac{L^2}{2} \left( \frac{WL^2}{12} - \frac{M^1}{2} \right)$$

$$M^1 = \frac{WL^2}{12}$$

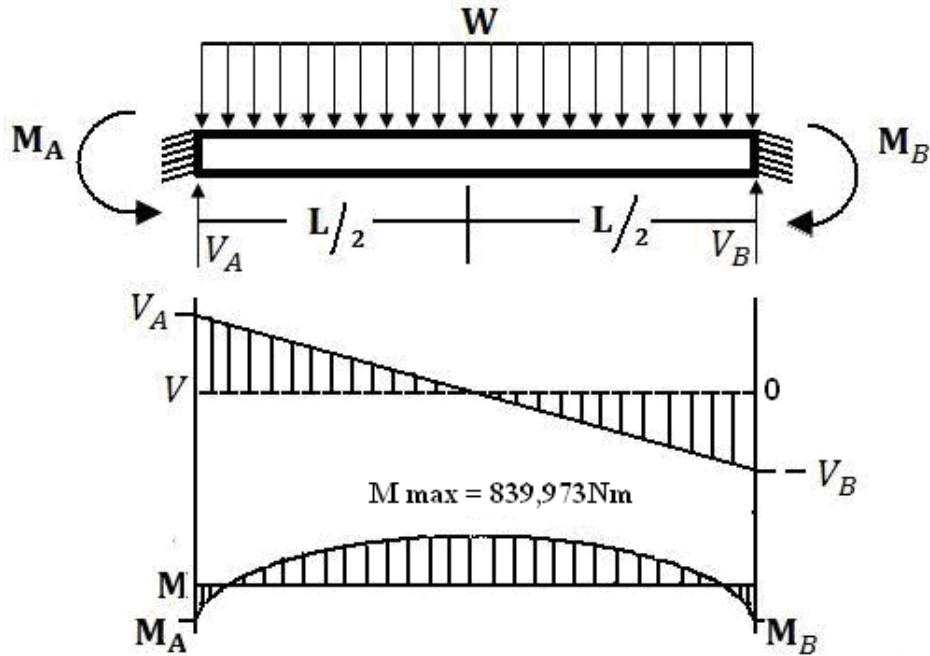
Es posible comprobar que la condición de  $V=0$  cuando  $X=L$  se satisface completamente pero en este caso no es necesario evaluarla porque ya han sido encontradas todas las incógnitas.

Reemplazando en esta ecuación se pueden obtener los valores de momento en los extremos de la viga.

$$M^1 = \frac{(3499,88 \text{ N/m})(1,2\text{m})^2}{12} = 419,986 \text{ Nm}$$

Al conocer todos los valores es posible realizar los diagramas de cortante y momento para obtener a partir de estos el momento máximo soportado por la viga.

**Figura 78.** Diagrama de cortante y momento flector.



Una vez obtenido el valor del momento máximo se calcula el esfuerzo máximo soportado por la viga a partir de la ecuación de flexión.

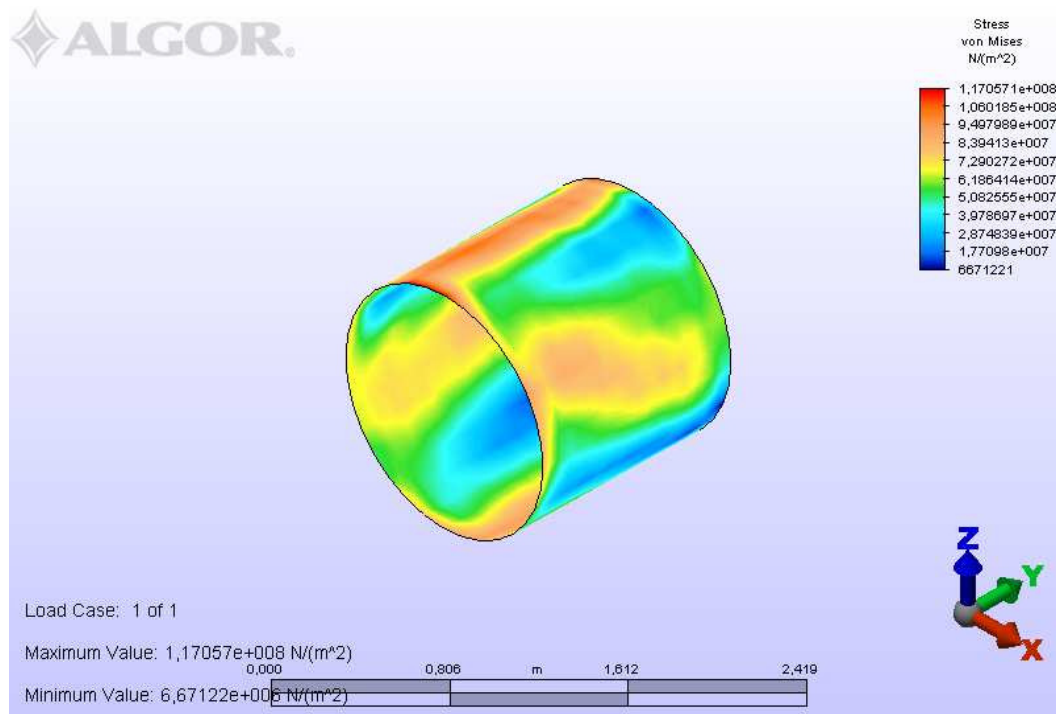
$$\sigma = \frac{Mc}{I}$$

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{(0,1237\text{m})(0,032\text{m})^3}{12} = 3,378 \times 10^{-7}$$

$$\sigma = \frac{(839,973\text{Nm})(0,016\text{m})}{3,378 \times 10^{-7}} = 3,97 \times 10^7 \text{ Pa}$$

Este valor corresponde al máximo esfuerzo presentado en el tambor según el modelo teórico, y se compara con el valor obtenido por el método de elementos finitos el cual es de  $7,3 \times 10^7 \text{ Pa}$ .

**Figura 79.** Esfuerzos obtenidos en el tambor por el método de elementos finitos.



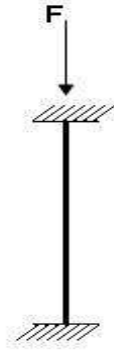
Realizado en el Software de análisis de elementos finitos, Algor V.19

Por lo cual es posible validar la metodología de los elementos finitos ya que la diferencia entre estos valores es de 45%, lo cual es un valor aceptable teniendo en cuenta que el modelo teórico se hace con base en una aproximación del sistema real.

**9.4.2 Modelo teórico para los radios.** Inicialmente se debe calcular la carga que soportara la columna en la condición más crítica es decir todo el peso del cable sobre dos radios.

$$P_{\max} = \frac{(6850\text{kg})(9.81\text{m/s}^2)}{2} = 33599,25\text{N}$$

**Figura 80.** Diagrama de la columna.



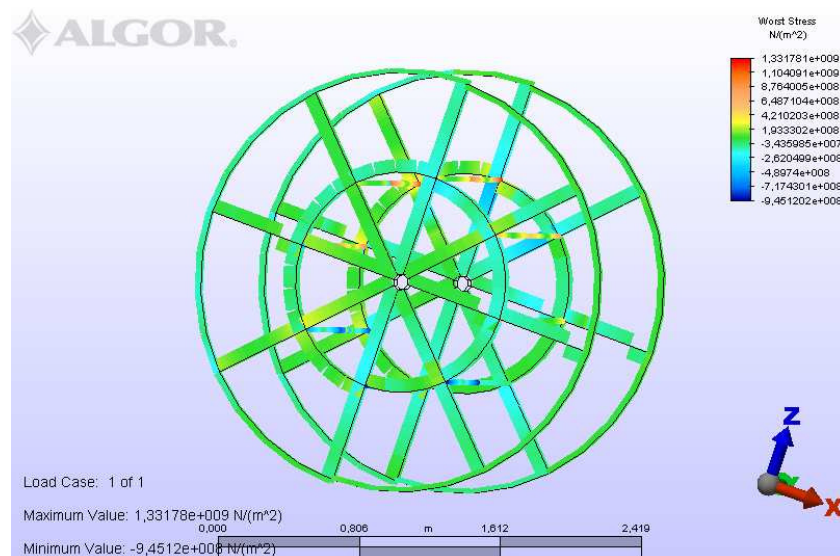
Donde  $F = P_{\max} = 3\,359,25\text{ N}$

Se considera el área de la del radio de  $7,67 \times 10^{-4}\text{ m}^2$  la cual se obtuvo de catálogos y aplicando la ecuación enunciada por la teoría para columnas se obtiene el valor del esfuerzo de la siguiente forma:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{3359,25\text{ N}}{7,67 \times 10^{-4}\text{ m}^2} = 4,3 \times 10^7\text{ Pa}$$

Este valor corresponde al máximo esfuerzo presentado en los radios según el modelo teórico, y se compara con el valor obtenido por el método de elementos finitos el cual es de  $3,8 \times 10^7\text{ Pa}$ .

**Figura 81.** Esfuerzos obtenidos en la estructura por el método de elementos finitos.



Realizado en el Software de análisis de elementos finitos, Algor V.19

Por lo cual es posible validar la metodología de los elementos finitos ya que la diferencia entre estos valores es de 11,6%, lo cual es un valor aceptable teniendo en cuenta que el modelo teórico se hace con base en una aproximación del sistema real.

## **9.5 REDISEÑO**

En la evaluación del comportamiento mecánico del carrete No 24 fabricado en acero ASTM A-36 y poli aluminio, se determino que el diseño existente actualmente para este carrete fabricado con madera no es una opción viable para este nuevo material, ya que como se logro comprobar con el análisis por elementos finitos, validado por el modelo teórico, este diseño no soporta la condición de trabajo cuando el carrete esta apoyado sobre las bandas, en la cual presenta un factor de seguridad de 0.9 lo cual indica una condición total de falla, ya que los esfuerzos presentados en el carrete son mayores a los que puede soportar el material (poli aluminio).

Por esta razón pese a que en las otras condiciones planteadas, apoyado en el buje y simulando la acción del montacargas, se obtuvieron factores de seguridad adecuados se debe descartar esta posibilidad de diseño, ya que la disposición normal del carrete es precisamente cuando se encuentra apoyado sobre las bandas.

Con el fin de encontrar una propuesta de diseño que mejore este factor de seguridad critico que se esta presentando se plantea la posibilidad de modificar el tambor del carrete ya que es en esta pieza en la que se presenta la condición más critica, de tal forma que se pueda trabajar en un rango seguro y el carrete pueda cumplir completamente la función para la que es diseñado.

Es necesario tener en cuenta las especificaciones de diseño planteadas inicialmente por medio de la metodología QFD en la cual es primordial no solo la funcionalidad del carrete sino que también se debe tener en cuenta el proceso de fabricación de este, de tal forma que se presente un rediseño que no solamente logre mejorar las deficiencias presentadas actualmente por el carrete sino que de igual forma se debe tener como objetivo la viabilidad de su fabricación.

Teniendo en cuenta estos criterios se plantea la posibilidad de reemplazar las duelas o tablas de poli aluminio que actualmente conforman el tambor, por anillos de este material, de tal forma que estos lo cubran completamente y no proporcionen ningún cambio adicional.



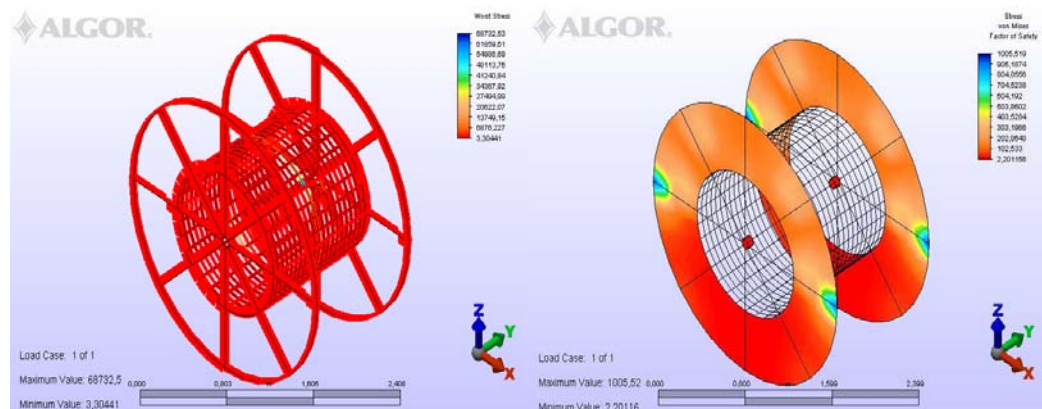
El análisis de esta posibilidad se realizó por el método de elementos finitos en el cual se realizaron varias iteraciones hasta encontrar el espesor adecuado para estos anillos de tal forma que optimice la funcionalidad del carrete al mejorar los valores de inercia y modulo de sección frente a los que se tienen actualmente con las duelas.

Con estos anillos se consigue que el tambor tenga las siguientes propiedades de sección:

- Inercia =  $0,00768\text{m}^4$
- Modulo de sección=  $0,01218\text{m}^3$

De esta forma se logra obtener un factor de seguridad en la peor condición (cuando el carrete esta apoyado sobre las bandas) de 3,3 en el tambor y de 2.2 en las tapas al colocar 20 anillos a lo largo de los 1,2m de longitud del tambor con un espesor de 0,010 m; como se muestra en la figura 83.

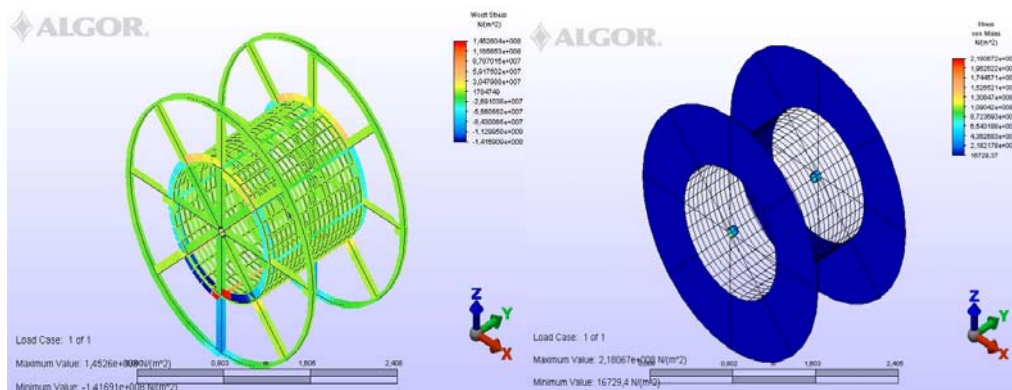
**Figura 82.** Factor de seguridad del rediseño del carrete en la condición más crítica.



Realizado en el Software de análisis de elementos finitos, Algor V.19

Los resultados de esfuerzos presentados en el carrete tienen valores máximos de 145MPa en el tambor y de 218MPa en las tapas del carrete; estos valores presentados para el poli aluminio son mucho más bajos que los presentados con el diseño inicial del carrete en el que los valores máximos presentados eran de 516,34MPa.

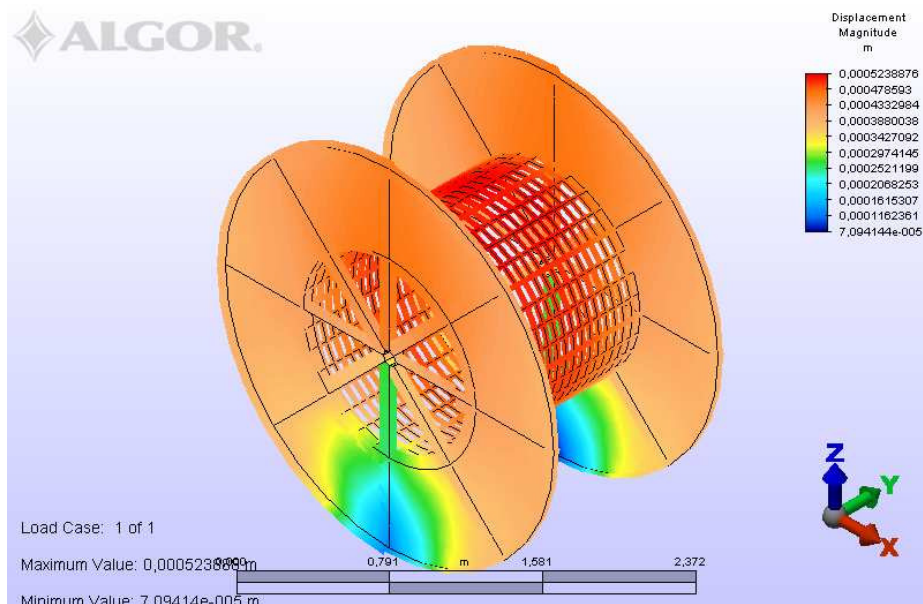
**Figura 83.** Esfuerzos del rediseño del carrete en la condición más crítica.



Realizado en el Software de análisis de elementos finitos, Algor V.19

El análisis de los desplazamientos presentados en esta condición proporciona resultados muy favorables ya que se tienen valores entre 0,00052m y  $7,094 \times 10^{-5}$  m.

**Figura 84.** Desplazamiento del rediseño del carrete en la condición más crítica.



Realizado en el Software de análisis de elementos finitos, Algor V.19

Estos resultados permiten garantizar que el carrete presente un comportamiento mecánico adecuado en las demás condiciones en las que se debe desempeñar ya que el análisis se realizó para el caso más crítico.

**Tabla 80.** Resultados del rediseño del carrete.

<b>Condición de trabajo</b>	<b>Esfuerzo máximo (MPa)</b>	<b>Factor de seguridad</b>	<b>Desplazamiento (m)</b>
Carrete apoyado sobre las bandas	218 en las tapas y 145 en el tambor.	2,2 en las tapas y 3,3 en el tambor	0,0005 en general
Carrete bajo la acción del montacargas.	44,1 en las tapas y 63,6 en el tambor.	8,4 en las tapas y 4,9 en el tambor.	0,0004 en general.
Carrete restringido en el buje.	10 en las tapas y de 65 en el tambor.	24 en las tapas y de 3,85 en el tambor.	0,0002 en general.

## 10. CONCLUSIONES

➤ En el análisis del proceso de diseño del carrete con el apoyo de la metodología QFD se logro comprobar que el material es un factor determinante en la fabricación de este carrete para empaque de cable No 24, ya que este parámetro de diseño presenta la mayor correlación con las necesidades de diseño alcanzando un valor máximo de influencia en estas del 20.7% representando un peso ponderado de 2.8, lo cual habilita aun más la posibilidad de realizar esta propuesta ya que no solo es posible obtener un optimo funcionamiento de esta pieza, sino que también se pueden subsanar inconvenientes de tipo económicos, técnicos, ambientales y de productividad, como lo indican los resultados de esta metodología.

➤ Al realizar las pruebas mecánicas a los materiales se logro determinar que el acero ASTM A-36 utilizado para la fabricación del carrete presenta variaciones en su composición química que hacen que sus propiedades mecánicas sean diferentes a las recomendadas, es decir que las proporciones de cada uno de los componentes químicos que conforman este acero no se encuentran dentro de los rangos normales establecidos teóricamente para el material; y estas grandes variaciones, que oscilan entre el 20 y el 66%, producen cambios altamente significativos en el comportamiento del material al alterar las propiedades mecánicas de este, producto de la variación de su composición química, en este caso la tenacidad del material presenta un comportamiento muy dúctil debido a la baja cantidad de fósforo ya que este material es el encargado de reducir el comportamiento de ductilidad y aumentar el tipo de fractura frágil; sin embargo esto no presento ningún inconveniente en la simulación del carrete con la cual se logro determinar que aun así el material es adecuado para esta aplicación en la industria.

➤ Por medio de la metodología de los elementos finitos se logro obtener grandes aproximaciones a la realidad que proporcionaron resultados confiables para realizar el análisis del comportamiento mecánico del diseño del carrete mixto No 24, Para constatar la veracidad de estos resultados se realizo una aproximación con el modelo teórico del sistema, y al comparar los resultados obtenidos con la aplicación de las dos metodologías se encontraron diferencias mínimas y aceptables (del 11.6 y 31%) que brindan una mayor confiabilidad de los resultados obtenidos en este proyecto mediante la implementación de la solución de tipo analítica.

➤ Se puede concluir que el poli aluminio reciclado de tetra pak tiene una gran aplicación en la fabricación de este carrete, pero es necesario para ello emplear un diseño adecuado, ya que el existente actualmente para fabricar el

➤ carrete mixto metal-madera No24, no es viable porque los factores de seguridad obtenidos en las condiciones de trabajo no son adecuados para aprobar el diseño. Lo anterior se puede sustentar gracias a la aplicación de la metodología de los elementos finitos la cual fue aplicada en este caso para obtener los resultados que permitieran estudiar el comportamiento mecánico del carrete bajo los aspectos de esfuerzos, deformaciones, y el factor de seguridad en cada una de las diferentes condiciones de trabajo presentadas por el carrete, evaluadas en la condición crítica de carga para poder determinar con certeza el adecuado desempeño del carrete en la industria.

➤ Se planteó una propuesta de diseño que proporciona unos factores de seguridad adecuados y un desempeño óptimo del carrete en las diferentes condiciones de trabajo, elevando el valor del factor de seguridad de 0.9 a 2.2 en la condición más crítica de trabajo, lo cual permite considerar esta opción de diseño desde el punto de vista de funcionalidad y además de ello la propuesta también es viable desde el aspecto del proceso de fabricación del carrete ya que la geometría que comprende este diseño es posible de manufacturar.

## **11. RECOMENDACIONES**

❖ El poli aluminio, al ser un material reciclado de tetra pak, es un material que presenta mucho ruido, lo cual puede ser causante de la alteración de las propiedades mecánicas de este y de un inadecuado desempeño del material en esta aplicación, por lo cual se recomienda realizar un adecuado proceso de selección antes de fabricar las laminas y/o piezas que serán utilizadas para la fabricación del carrete.

❖ Es necesario evaluar diferentes alternativas para el diseño del carrete mixto No 24 fabricado en metal – poli aluminio, con el fin de determinar finalmente la mejor opción que permita maximizar la funcionalidad del carrete y sea viable desde el punto de vista del proceso de manufactura y económico; ya que con un adecuado diseño del carrete es posible implementar el poli aluminio para esta aplicación industrial.

## BIBLIOGRAFÍA

ASKELAND, Donald R. La ciencia e ingeniería de los materiales. 3 ed. México: International Thompson editores, 1998. 790 p.

ASTM International E23-07, Aceros. Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials [en línea]. Cali: Universidad Autónoma de Occidente, 2008. [Consultado 5 de Junio, 2008]. Disponible en Internet: [http://enterprise.astm.org/SUBSCRIPTION/filtrexx40.cgi?-P+cart+sjxd2035+/usr6/htdocs/newpilot.com/SUBSCRIPTION/REDLINE\\_PAGE\\_S/E23.htm](http://enterprise.astm.org/SUBSCRIPTION/filtrexx40.cgi?-P+cart+sjxd2035+/usr6/htdocs/newpilot.com/SUBSCRIPTION/REDLINE_PAGE_S/E23.htm)

ASTM. Aceros. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. International E 8M-08 [en línea]. Cali: Universidad Autónoma de Occidente, 2008. [Consultado 5 de Junio, 2008]. Disponible en Internet: [http://enterprise.astm.org/SUBSCRIPTION/filtrexx40.cgi?-P+cart+sjxd2035+/usr6/htdocs/newpilot.com/SUBSCRIPTION/REDLINE\\_PAGE\\_S/E8E8M.htm](http://enterprise.astm.org/SUBSCRIPTION/filtrexx40.cgi?-P+cart+sjxd2035+/usr6/htdocs/newpilot.com/SUBSCRIPTION/REDLINE_PAGE_S/E8E8M.htm)

ASTM. Plásticos. Método de ensayo para determinar las propiedades de compresión en los plásticos. International D695, [en línea]. Cali: Universidad Autónoma de Occidente, 2008. [Consultado 5 de Junio, 2008]. Disponible en Internet: [http://enterprise.astm.org/SUBSCRIPTION/filtrexx40.cgi?-P+cart+sjxd2035+/usr6/htdocs/newpilot.com/SUBSCRIPTION/REDLINE\\_PAGE\\_S/D6.htm](http://enterprise.astm.org/SUBSCRIPTION/filtrexx40.cgi?-P+cart+sjxd2035+/usr6/htdocs/newpilot.com/SUBSCRIPTION/REDLINE_PAGE_S/D6.htm)

CAPUZ RIZO, Salvador. Introducción al proyecto de producción. Ingeniería concurrente para el diseño del producto. 2 ed. Madrid: Alfaomega, 2001. 224 p.

CHANDRUPATLA, T., BELEGUNDU A. Introducción al Estudio del Elemento Finito en Ingeniería. 2 ed. México: Prentice Hall editores. 1999. 480p.

CROSS, Nigel. Métodos de diseño, Estrategias para el diseño de productos. Reino Unido: Limusa Noriega editores, 1999. 190p.

Desarrollo tecnológico para fabricar carretes para empaque de cables, utilizando como materia prima Tetra pak de origen post-industrial y post-consumo en sustitución de madera de bosque nativo, Colciencias. Bogotá DC., 2007. 7 p.

Despliegue de la función de calidad Q.F.D [en línea]. Oaxaca México: Instituto de innovación y calidad gubernamental, 2000. [Consultado 2 de Abril, 2008]. Disponible en Internet: [http://www.e-oaxaca.gob.mx/innovacg/descargar\\_archivo.php?download=QUALITY%20FUNCTION%20DEPLOYMENT.doc&c=CALIDAD%20PARA%20TI](http://www.e-oaxaca.gob.mx/innovacg/descargar_archivo.php?download=QUALITY%20FUNCTION%20DEPLOYMENT.doc&c=CALIDAD%20PARA%20TI).

El diseño en ingeniería. Universidad Tecnológica Nacional. Ciudad de buenos aires, 2004. 24p.

Enciclopedia Virtual de Ingeniería Mecánica: Criterio de resistencia estática [en línea]. España: Universitat Jaume I, 2006. [Consultado 18 de Julio, 2008]. Disponible en Internet: [http://www.emc.uji.es/d/mecapedia/criterio\\_de\\_resistencia\\_estatica.htm](http://www.emc.uji.es/d/mecapedia/criterio_de_resistencia_estatica.htm)

Evaluación de propiedades mecánicas del material reciclado. TETRA PAK Centro de caracterización y desarrollo de materiales UFSCar/ UNESP. Brasil, 2005. 8 p.

GROOVER, Mikell. Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, Procesos y Sistemas. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, 1997. 1062 p.

Herramientas de QFD [en línea]. Oaxaca México: Asociación latinoamericana de QFD, 2008. [Consultado 20 febrero de 2008]. Disponible en: [http://www.qfdlat.com/Herramientas\\_QFD/herramientas\\_qfd.html](http://www.qfdlat.com/Herramientas_QFD/herramientas_qfd.html)

HIBBELER R. Mecánica de materiales. México: Pearson Educación, 2006. 896p.

Informe de ¿Que es el QFD? Asociación Latinoamericana de QFD. México DF, 2004. 3 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Acero. Método de ensayo para determinar las propiedades de dureza en los aceros. NTC 3996. Bogota: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), 2007. 15p

----- Plásticos. Método de ensayo para determinar las propiedades de tensión en los plásticos. NTC 595. Bogota: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), 2007. 24p

----- Plásticos. Acondicionamiento de plásticos para ensayo. NTC 718. Bogota: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), 1999. 12p

Matemáticas para el QFD: Matriz de Relaciones. [CD-ROM]. México D.F.: Asociación Latinoamericana de QFD, 2008. 1 CD-ROM.

Medio Ambiente [en línea]. Bogota: Tetra Pak, 2006. [Consultado 15 de diciembre, 2007]. Disponible en Internet: <http://www.TetraPak.com.co/index.php?option=content&task=view&id=4&itemId=26>

Mercado Lácteo, la apuesta a la segmentación [en línea]. Bogota: Tetra Pak, 2006. [Consultado 14 de diciembre, 2007]. Disponible en Internet: <http://www.infoleche.com /img/info%2019.pdf>



NORTON, Robert. Diseño de máquinas, Worcester Polytechnic Institute. Mexico DF: Pearson education, 1995. 774p.

Presentación del Proceso de Fabricación del Ecoplak y Aplicaciones [en línea]. Bogota: Ecoplak, 2008. [Consultado 14 de diciembre, 2007]. Disponible en Internet: <http://www.ereciclaje.com/reciclables/tetrapack/index.htm>.

Professional MES [en línea]. Pittsburgh: Algor Products, 2008. [Consultado 10 de junio de 2008]. Disponible en internet: <http://algor.com/products/Profes1748/default.asp>

QFD: conceptos, aplicaciones y nuevos desarrollos. Universidad del CEMA. Mexico DF, 2000. 37p.

Reciclado [en línea]. Bogota: Tetra Pak, 2006. [Consultado 09 de diciembre, 2007]. Disponible en Internet [http://www.tetrapak.com/spain/content/frset\\_main.asp](http://www.tetrapak.com/spain/content/frset_main.asp).

Reciclaje de embalajes para alimentos líquidos [en línea]. Bogota: Tetra Pak, 2006. [Consultado 14 de diciembre, 2007]. Disponible en Internet: [http://www.tetra pak.com.br /tetravc/meio/meio\\_reciclagem.asp](http://www.tetra pak.com.br /tetravc/meio/meio_reciclagem.asp)

Software 'Data Studio' V 1.9.8 [en línea]. California: Pasco, 2006. [Consultado 08 de junio, 2008]. Disponible en Internet: <http://store.pasco.com/forms/download.cfm?DID=9&downloadtype=DataStudio>

Solid Edge, Academy University V.19 [CD-ROM]. Estados Unidos: UGS Corporation, 2006. 1 CD-ROM.

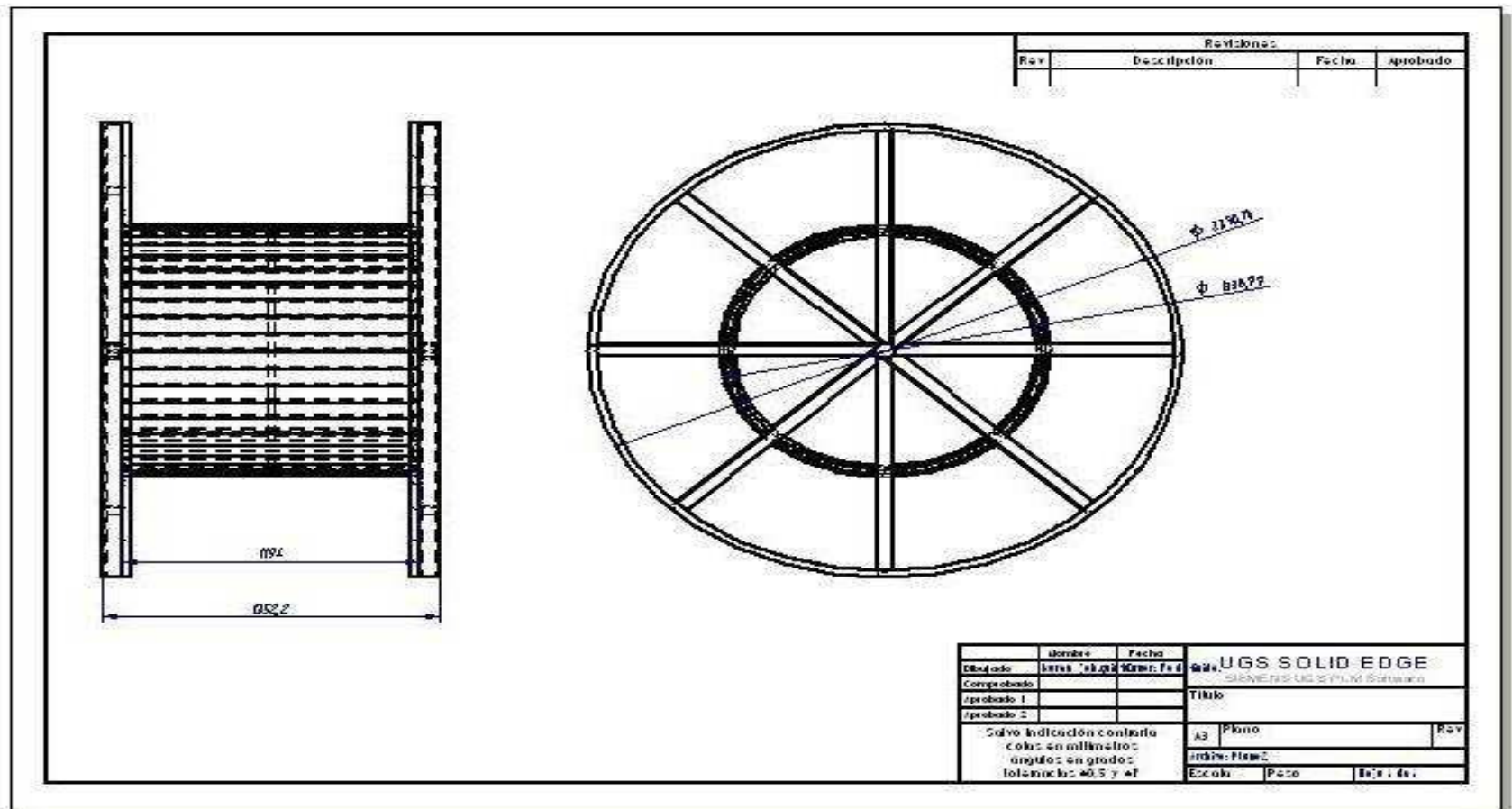
SHARKOON, James. Detailed Mechanical Design: A practical guide. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2000. 216 p.

TRUEDELL. C. Ensayos de Historia de Mecánica. Madrid: Editorial Tecnos, 1975. 344p.

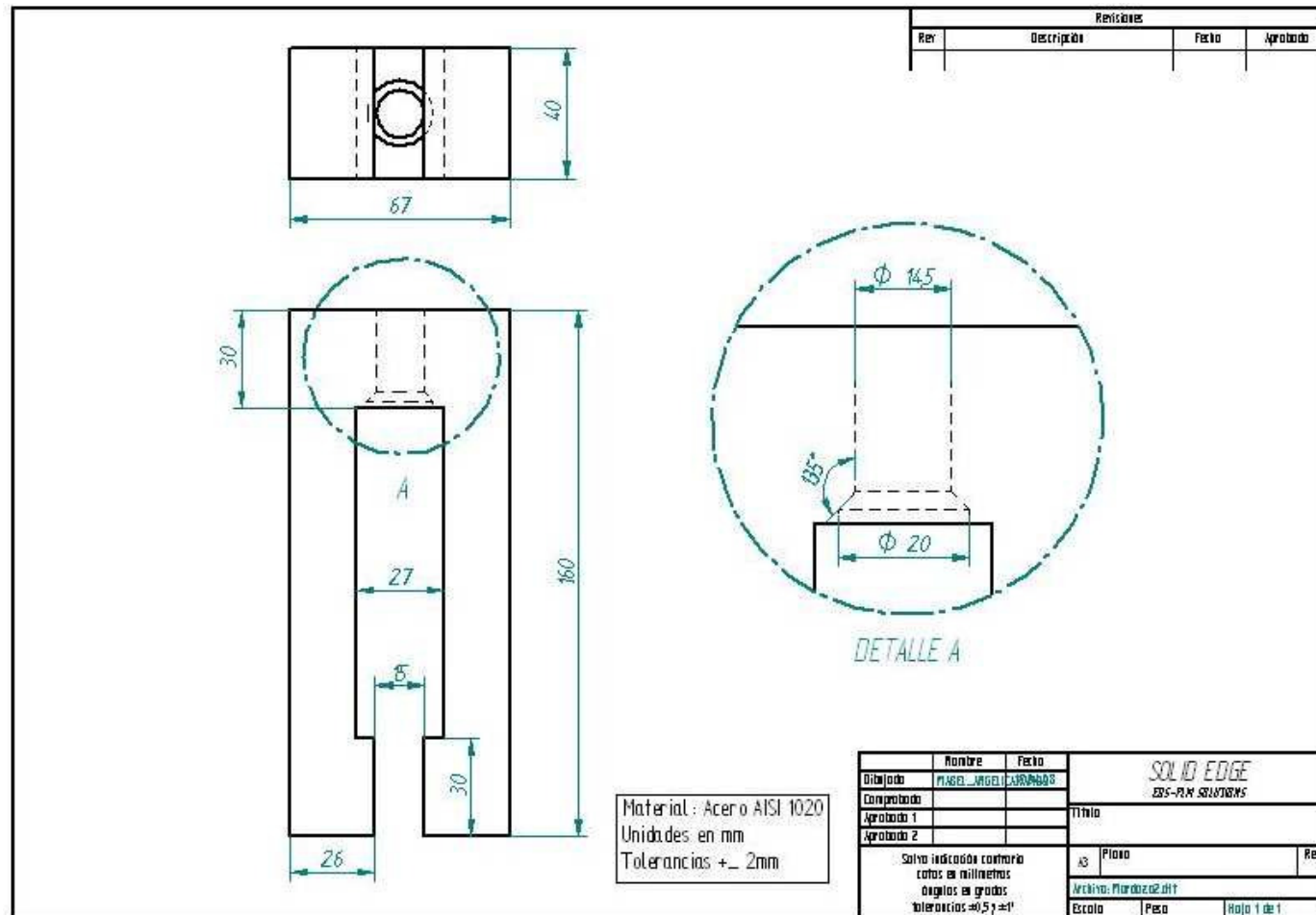
ZIENKIEWICZ, O.C.; OÑATE IBÁÑEZ DE NAVARRA. El método de los elementos finitos. Barcelona: Reverté, 1982. 903 p.

## ANEXOS

### Anexo A. Plano del carrete mixto No 24.



**Anexo B. Plano de las mordazas empleadas para el ensayo a tracción paralelo al grano.**



**Anexo C. Plano de las mordazas empleadas para el ensayo a tracción perpendicular al grano.**

